



Contribution à la mise en place d'un PLM muséologique dédié à la conservation et la valorisation du patrimoine

Benjamin Hervy

► To cite this version:

Benjamin Hervy. Contribution à la mise en place d'un PLM muséologique dédié à la conservation et la valorisation du patrimoine : Modélisation et intégration de données hétérogènes sur un cycle de vie produit complexe. Sciences de l'ingénieur [physics]. Ecole Centrale de Nantes (ECN), 2014. Français. NNT : . tel-01102311

HAL Id: tel-01102311

<https://hal.science/tel-01102311>

Submitted on 12 Jan 2015

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution| 4.0 International License

Thèse de Doctorat

Benjamin HERVY

*Mémoire présenté en vue de l'obtention du
grade de Docteur de l'École centrale de Nantes
sous le label de l'Université de Nantes Angers Le Mans*

École doctorale : Sciences pour l'ingénieur, géosciences, architecture

Discipline : Génie Mécanique, Productique, Transport
Unité de recherche : IRCCyN, UMR CNRS 6597

Soutenue le 12 décembre 2014

Contribution à la mise en place d'un PLM muséologique dédié à la conservation et la valorisation du patrimoine **Modélisation et intégration de données hétérogènes sur un cycle de vie produit complexe**

JURY

Président :	M. Dimitris KIRITSIS , Professeur, École Polytechnique Fédérale de Lausanne
Rapporteurs :	M. Lionel ROUCOULES , Professeur des Universités, Arts et Métiers ParisTech M. Manuel ZACKLAD , Professeur titulaire de la chaire Expressions et Cultures au Travail, CNAM
Examineurs :	M. Livio DE LUCA , Directeur de recherche, CNRS M. Florent LAROCHE , Maître de conférences, École Centrale de Nantes M. Jean-Louis KEROUANTON , Maître de conférences, Université de Nantes
Invité :	M. Bertrand GUILLET , Conservateur en chef du patrimoine, Musée d'histoire de Nantes
Directeur de thèse :	M. Alain BERNARD , Professeur des Universités, École Centrale de Nantes

Remerciements

Avant de remercier toutes les personnes qui m'ont aidé et accompagné durant ces trois années de thèse, je tiens à exprimer ma considération pour l'Association Nationale de la Recherche et de la Technologie qui a permis de financer la bourse CIFRE. Je remercie également M. Olivier Ménard qui a cru dans l'intérêt de ces recherches et qui a soutenu le dossier de cette thèse CIFRE.

Parmi les personnes que je voudrais remercier, je tiens à commencer par mon directeur, Alain Bernard, Professeur des Universités à l'École Centrale de Nantes, ainsi que mes co-encadrants de thèse, Florent Laroche, Maître de conférences en génie industriel à l'École Centrale de Nantes et Jean-Louis Kerouanton, Maître de conférences en histoire des techniques à l'Université de Nantes pour m'avoir tous les trois transmis une somme considérable de connaissances et de conseils. Je tiens d'ailleurs à remercier tout particulièrement Florent Laroche qui m'aura transmis sa vision du métier d'ingénieur et qui m'aura permis d'apprendre de nouvelles compétences par les différents projets auxquels il m'a associé. Je ne saurais ici décrire combien je lui suis redevable et combien m'ont apporté nos échanges, aussi bien professionnels que personnels.

Je remercie également les membres du jury, les professeurs Dimitris Kiritsis, Lionel Roucoules, Manuel Zacklad et Livio de Luca pour l'intérêt qu'ils ont manifesté et pour avoir accepté d'évaluer mes travaux, c'est un grand honneur pour moi.

Je tiens aussi à mentionner les membres de mon comité de suivi de thèse pour leurs précieux conseils et remarques tout au long de ces trois années, et qui ont contribué à la bonne marche de ces travaux : Nicolas Perry et Sylvain Laubé.

Je souhaite ici bien sûr remercier mes collègues de l'École Centrale de Nantes et de l'IRCCyN :

- Tous les membres de l'équipe IS3P à laquelle j'ai été rattaché. La diversité des profils et des travaux réalisés par les chercheurs de l'équipe a été une vraie source d'inspiration. Merci également à Emily pour sa gentillesse et son aide pour les questions administratives ;
- Les membres du CERMA et du groupe de recherche Ville&Image de l'IRSTV avec qui j'ai pu travailler, notamment Myriam Servières, Vincent Tourre, Guillaume Moreau, Toinon Vigier, et Jean-Marie Normand, spécialistes en traitement de l'image, en réalité virtuelle et en systèmes d'information géographique ;
- Bien évidemment, je remercie mes collègues doctorants de l'IRCCyN que j'ai pu côtoyer pendant ces 3 années et tout particulièrement Maxime et Adrien avec qui j'aurai partagé non seulement cette période de doctorat mais également les trois années de formation d'ingénieur à l'École Centrale de Nantes. Je vous souhaite à tous deux un avenir radieux.

Il m'est impossible d'oublier mes collègues du château des ducs de Bretagne. J'y ai rencontré des gens formidables et un contexte professionnel extrêmement enrichissant, sans parler du cadre de travail fabuleux qu'offre ce château. Je remercie donc :

- Bertrand Guillet, directeur et conservateur en chef du patrimoine pour son intérêt dans nos travaux et pour avoir accepté d'appuyer ce projet ;

- Christophe Courtin, responsable du service des projets numériques pour tout ce qu'il m'a appris et pour ces quatre années passées ensemble à travailler sur le projet Nantes1900 ;
- Caty Royant, ma collègue chargée du système de gestion des collections et des projets internet, pour sa gentillesse et toutes les discussions que nous avons pu avoir. Mon seul regret aura été de ne pas avoir pu plus collaborer ensemble sur de futurs projets ;
- Nathalie, Lydie et Aurélie pour leur gentillesse sans faille, leur bonne humeur, et qui m'auront de nombreuses fois aidé dans la jungle administrative ;
- Toute l'équipe technique pour leur aide précieuse, toujours prêts à rendre service, eux qui m'ont assisté tant de fois pour la résolution de problèmes, notamment Aurélien, Manuel, Alvaro, Philippe, Joss, Mélik, Dominique et tous les autres ;
- Anne, Agathe, Karine, Krystel, Aurélie, Eva et tous les membres de l'équipe de conservation, pour leurs connaissances et leur passion, et auprès de qui j'ai pu découvrir ce si mystérieux mais passionnant monde des musées, sans oublier Michel pour sa sympathie, son sens de l'écoute et sa bonne humeur ;
- Laurence pour sa précieuse collaboration sur les questions d'usage et de l'offre aux publics ainsi que toute l'équipe des publics, notamment les médiatrices mais également les agents d'accueil pour tous ces sourires qui rendent le quotidien plus agréable ;
- tous ceux que j'aurais pu oublier tellement ils sont nombreux à avoir pu m'aider ici ou là, notamment les agents du service Sécurité&Incendie, toujours prêts à rendre service.

Je remercie bien sûr mes collègues du Centre François Viète, que je ne me lasse jamais d'écouter lors des séminaires tant leur passion est communicative : Stéphane, Pierre, Karine, Jenny, Colette, et tous les autres.

Je n'oublie pas tous les autres chercheurs avec qui nous avons pu collaborer ou rencontrer au fil des conférences, en particulier les chercheurs de l'Université de Liège avec qui nous avons pu avoir de nombreux et fructueux échanges, notamment Cyril et Roland.

Je voudrais également mentionner une personne qui m'a marqué il y a maintenant plusieurs années alors qu'il était mon professeur d'histoire-géographie au lycée Saint-Jean Baptiste de la Salle : M. Jean Bourgeon. À cette époque où le choix d'orientation devenait inévitable bien que cornélien, j'entends encore cette phrase qu'il prononça au détour d'une discussion : « Peut-être qu'un jour, qui sait, le hasard te permettra de concilier des études scientifiques avec ton intérêt pour l'histoire ». J'ai depuis eu la chance de le revoir au détour d'un congrès pour la société d'archéologie de Bretagne, et je voudrais ici le remercier et lui dire que je n'ai jamais oublié ces quelques mots.

Enfin, je terminerai ces remerciements par ceux qui me côtoient et me soutiennent au quotidien et sans qui je ne serais pas qui je suis aujourd'hui. Je pense à mes amis et proches, ma soeur Charlotte, mon frère François, Marine — qui m'aura connu aux débuts de ce doctorat et pour qui ces trois ans n'auront pas toujours été une partie de plaisir, Maxime, ainsi que Quentin et Nicolas même si la vie nous a éloignés. Vous m'aurez permis d'avoir ces bouffées d'oxygène nécessaires pour garder le moral. Je pense enfin à mes parents, qui n'auront cessé de me motiver, même dans les moments les plus durs, et ce depuis aussi longtemps que je me souviens. J'ai de la chance de vous avoir, j'en suis conscient et pour ça je vous aime.

Merci à tous,
Benjamin

Table des matières

Remerciements	3
Introduction	15
1 Contexte et problématique industrielle	19
1.1 Patrimoine culturel et muséologie	19
1.2 Contexte industriel	21
1.2.1 Le château des ducs de Bretagne — Musée d'histoire de Nantes	22
1.2.2 Contexte du projet	26
1.2.3 L'usage du numérique au musée d'histoire de Nantes	28
1.3 Problématiques industrielles	29
1.4 Positionnement de la thèse	30
2 Formalisation et valorisation des connaissances historiques	33
2.1 Propos introductif et première hypothèse	33
2.2 Critères d'évaluation et bonnes pratiques	36
2.2.1 Convention du patrimoine de l'UNESCO	36
2.2.2 Charte de Londres	37
2.2.3 Charte de Séville	37
2.2.4 Principles for the recording of monuments, groups of buildings and sites, ICOMOS	38
2.2.5 Conclusion	39
2.3 Sources	40
2.3.1 L'ingénierie documentaire	40
2.3.2 Les sources en histoire	41
2.4 Systèmes de modélisation et d'organisation des connaissances	48
2.4.1 Système de gestion de données spatio-temporelles	49
2.4.2 Modèles produit-processus pour le PLM	49
2.4.3 Ontologies formelles et web sémantique	50
2.4.4 Web socio-sémantique	52
2.4.5 Systèmes de gestion existants pour le patrimoine et les connaissances historiques	54
2.5 Valorisation du patrimoine par le numérique	59
2.5.1 Valoriser la recherche en histoire	59
2.5.2 Muséographie et interactivité	60
2.5.3 Le numérique et ses enjeux	60
2.6 Verrous scientifiques et hypothèses de recherche	63
2.6.1 Problématique scientifique	63
2.6.2 Hypothèses de recherche	63
2.6.3 Approche proposée	65

3	Proposition d'une méthode de capitalisation de connaissances en contexte muséal	67
3.1	Processus global de patrimonialisation	69
3.2	Constitution d'un corpus numérique de référence	71
3.3	Modélisation et intégration des connaissances	73
3.3.1	Mise en relation des « fiches connaissance »	76
3.3.2	Association des données physiques aux items	77
3.3.3	Système d'organisation des connaissances	78
3.4	Valorisation et capitalisation	79
3.5	Conclusion sur la méthodologie proposée	82
3.5.1	Modèle conceptuel muséologique	82
3.5.2	Vision processus globale	86
3.6	Conclusion	88
4	Mise en place d'un système de gestion des connaissances historiques pour les musées	91
4.1	Objectifs liés à la maquette du port de Nantes en 1900	91
4.2	Description des produits considérés	93
4.2.1	Sources historiques	93
4.2.2	Objets patrimoniaux	93
4.2.3	Représentations intermédiaires : artefacts virtuels	93
4.3	Ressources	94
4.4	Processus mis en œuvre	95
4.4.1	Constitution du corpus de documents	95
4.4.2	Numérisation	97
4.4.3	Modélisation	99
4.4.4	Création des fiches connaissance	102
4.4.5	Interface de gestion	103
4.4.6	Synthèse sur l'intégration des données	110
4.5	Conclusion	115
5	Systèmes de visualisation et d'interaction pilotés par les connaissances	117
5.1	Introduction	117
5.2	Dispositif muséographique de valorisation d'un objet patrimonial	118
5.2.1	Présentation du dispositif	120
5.2.2	Cas d'utilisation	123
5.2.3	Évaluation	127
5.2.4	Conclusion sur le dispositif muséographique	129
5.3	Système immersif pour l'exploration et la manipulation de données historiques	129
5.3.1	Objectifs	130
5.3.2	Méthodologie	131
5.3.3	Proposition d'une interface de visualisation	132
5.3.4	Typologie des informations manipulées	132
5.3.5	Affichage et navigation dans la scène virtuelle	133
5.3.6	Conclusion et perspectives	137
5.4	Conclusion	138
	Conclusion	141
A	Analyse systémique du musée d'histoire de Nantes	149
B	Synthèse du DHRM	151

C	Vue tabulaire des étapes du processus de patrimonialisation	155
D	Évaluation qualitative	157
E	Compte-rendu DHIC2013	163
F	Proposition initiale du sujet de thèse	167
F.1	Le contexte industriel du projet	167
F.2	Le contexte scientifique du projet	168
F.3	Objectifs de la thèse / Résultats attendus / Défis scientifiques et techniques à relever . .	169
F.4	Cadre de la thèse / modalités pratiques	170
F.5	Références bibliographiques	171
G	Cahier des charges fonctionnel pour le projet Nantes1900	173

Table des figures

1	Organisation du manuscrit avec le lien entre les chapitres et les problématiques	18
1.1	Organisation du chapitre	21
1.2	Exemple de la notice AdLib associée à la maquette d'architecture du pont transbordeur présentée salle 26 du musée d'histoire de Nantes	24
1.3	Modèle simplifié de l'objet en contexte muséal et des activités associées	25
1.4	Maquette du port de Nantes en 1900 dans la salle 21 du musée d'histoire de Nantes. Crédits : Musée d'histoire de Nantes	26
1.5	Analyse fonctionnelle externe du système d'information attendu	30
2.1	Cartographie des domaines couverts par l'état de l'art	34
2.2	Schéma fonctionnel illustrant le modèle OAIS (Consultative Committee for Space Data Systems, 2012)	40
2.3	Schéma UML définissant le concept d'objet-information dans le modèle OAIS (Consultative Committee for Space Data Systems, 2012)	41
2.4	Exemple de la notice d'un pulvérisateur présente dans la base Joconde.	43
2.5	Le système PLM, d'après (Le Duigou, 2010)	51
2.6	Le cake sémantique. « Semantic Web Stack » par W3C - http://it.wikipedia.org/wiki/File:W3C-Semantic_Web_layerCake.png . Sous licence Public domain via Wikimedia Commons	52
2.7	Construction d'un framework socio-sémantique basé sur un treillis agent-concept d'après (Roth, 2013). À partir d'associations entre des concepts et des agents, le treillis est construit de manière hiérarchique au moyen de regroupements successifs.	53
2.8	Schéma UML du modèle Hypertopic	54
2.9	Principales classes proposées dans le modèle de référence du CIDOC (Crofts <i>et al.</i> , 1999)	55
2.10	Diagramme de classes du modèle EDM. Les classes en bleu sont celles introduites par EDM tandis que les classes en blanc proviennent de standards existants (European Union, 2014, p.6).	56
2.11	Représentation conceptuelle d'une information historique par (Janowicz, 2009)	57
2.12	Schéma UML du méta-modèle DHRM proposé par (Laroche, 2007)	58
2.13	Cas d'étude (présent dans (Laroche, 2007) de la machine à laver le sel présentée à l'écomusée de Batz-sur-mer. La figure montre les différents <i>schèmes</i> à étudier, permettant de re-contextualiser le cycle de vie de l'objet.	59
2.14	Maquette virtuelle fonctionnelle du Canot à vapeur de 1861 d'après (Laroche <i>et al.</i> , 2010b)	61
2.15	Description sémantique d'une œuvre architecturale par (De Luca <i>et al.</i> , 2011)	62
2.16	Articulation des problématiques scientifiques et industrielles	64
3.1	Représentation schématique des objectifs. Le cube représente l'articulation entre les compétences métiers, l'objet patrimonial et les champs d'application possibles.	68
3.2	Illustration de la démarche envisagée pour l'élaboration d'une méthodologie	69
3.3	Méthodologie générale pour la conservation du patrimoine technique et industriel d'après (Laroche, 2007, p. 211) et liens avec la vue processus de la figure 3.4	70

3.4	Diagramme SADT de description du processus global de patrimonialisation.	71
3.5	Vue processus de la création du corpus numérique de documents historiques	72
3.6	Diagramme SADT de description du processus de modélisation et d'intégration des données.	74
3.7	Représentation des liens entre vues externe et interne pour la reconstitution des informations.	76
3.8	Représentation UML du système d'organisation des connaissances historiques (classes manipulées dans l'activité A2)	78
3.9	Processus de visualisation et de manipulation d'informations adaptées au contexte d'utilisation	80
3.10	Processus de capitalisation de connaissances en contexte d'utilisation	80
3.11	Représentation UML du système de visualisation et d'interaction (classes vertes) piloté par les connaissances du SOC (orange) : activités A3 et A4	81
3.12	Framework complet proposé pour la capitalisation, l'intégration et la visualisation des connaissances historiques pour la muséologie	84
3.13	Vision processus globale de la méthodologie proposée pour la capitalisation et la valorisation des connaissances historiques	87
3.14	Représentation schématique de la méthodologie appliquée à un cas d'étude patrimonial : la méthodologie propose une solution générique au problème de valorisation et de gestion des données liées aux objets patrimoniaux	89
4.1	Schéma global de l'approche considérée	92
4.2	Processus opérationnel pour la valorisation des maquettes historiques par la capitalisation des connaissances	96
4.3	Extrait de la figure 3.13 relatif au processus illustré dans cette section	96
4.4	Extrait de la figure 3.13 relatif au processus illustré dans cette section	97
4.5	La maquette du quartier Saint-Similien numérisé : (a) en 2D par photo-stacking (b) en 3D	99
4.6	Extrait de la figure 3.13 relatif au processus illustré dans cette section	99
4.7	Schéma physique de la base de données implémentée pour la gestion des données du projet Nantes1900	100
4.8	Exemple d'instanciation du modèle avec le cas des chantiers Dubigeon. Les concepts sémantiques ou sujets d'étude correspondant à des fiches sont en bleu, et les données géographiques sont en orange	101
4.9	Extrait de la figure 3.13 relatif au processus illustré dans cette section	102
4.10	Interface principale une fois l'utilisateur authentifié. Un menu propose les différentes actions possibles selon le profil et les droits de l'utilisateur.	104
4.11	Répartition des éléments d'intérêt présents dans le système et étant géo-localisés. Les marqueurs représentent une indication ponctuelle approximative de l'emplacement des items dans la base de données. La figure montre également l'estimation de l'empreinte géographique de la maquette du port de Nantes	106
4.12	Extrait de la figure 3.13 relatif au processus illustré dans cette section	106
4.13	Interface dédiée à la géolocalisation des éléments de la maquette. L'utilisateur peut créer une nouvelle fiche à partir de la carte ou référencer un élément existant sur la carte.	107
4.14	Positionnement des éléments sur l'orthophoto issue de la numérisation par photogrammétrie de la maquette du quartier Saint-Similien. Cette étape a été réalisée manuellement à l'aide du logiciel libre QGIS.	108
4.15	Extrait de la figure 3.13 relatif au processus illustré dans cette section	108
4.16	Interface dédiée à la gestion des fiches par les modérateurs. Le système propose l'ensemble des fiches et un filtre pour effectuer un tri : par titre, par statut, etc.	109
4.17	Interface dédiée à la modification d'une fiche. Le modérateur a la possibilité de modifier les différents champs, de créer une annotation ou d'y répondre, de donner un statut à la fiche puis de valider les modifications selon le service auquel l'utilisateur appartient.	110

4.18	Représentation du réseau formé par la mise en relation des fiches connaissance. La taille et la couleur des nœuds du graphe sont fonction du nombre de liens. Graphe réalisé avec le logiciel Gephi (Bastian <i>et al.</i> , 2009).	114
4.19	Illustration de la notion de parcours au sein du réseau sémantique à partir des connexions entre items.	115
4.20	Mise en évidence des activités de la méthodologie détaillée au chapitre 3 traitées dans ce chapitre	116
5.1	Visualisation et capitalisation des connaissances historiques assistées par la réalité virtuelle	118
5.2	Extrait de la figure 3.13 mettant en évidence les processus illustrés dans ce chapitre. Seule la rétro-action permettant de modifier la modélisation de l'activité A21 n'est pas traitée.	118
5.3	Aperçu du dispositif muséographique final envisagé pour la valorisation de la maquette du port de Nantes en 1900 présentée en salle 21 du musée d'histoire de Nantes	119
5.4	Synoptique réseau envisagé pour le câblage des éléments audiovisuels et informatiques. Crédits : Arnaud Waels.	121
5.5	Vue d'ensemble du dispositif muséographique servant de démonstrateur : l'écran tactile de 27" est disposé devant la maquette et un vidéo-projecteur est positionné au-dessus à une distance correspondant à la distance focale de la lentille du VP.	122
5.6	Orthophoto de la maquette Saint-Similien réalisée par photogrammétrie.	123
5.7	Aperçu de l'interface graphique lors de la sélection d'un élément	124
5.8	Comportement du système lors de la sélection d'un utilisateur. Le programme, développé en Python et utilisant Mayavi (http://docs.enthought.com/mayavi/mayavi/) et Networkx, montre l'articulation des « rebonds thématiques » tels qu'ils sont présents dans le système d'information décrit au chapitre 4.	125
5.9	Aperçu du dispositif lors de la sélection d'un élément	126
5.10	Résultats statistiques des sélections des utilisateurs sur le dispositif de démonstration durant 3 jours d'exposition.	128
5.11	Informations manipulées : modèle 3D numérisé (a) et réseau sémantique (b).	131
5.12	Représentation des éléments géo-localisés avec (a) ou sans (b) géométrie 3D dans la scène virtuelle.	132
5.13	Visualisation des connexions entre les éléments dans la scène 3D virtuelle (ici la scène 3D est une scène fictive pour illustrer les métaphores de signalisation).	133
5.14	Représentation 3D des entités sémantiques et leurs connexions dans la base de données (cf. figure 5.8)	134
5.15	Aperçu de la scène 3D virtuelle avec la mise en surbrillance de l'élément sélectionné et des éléments associés dans la base de données. Ce mode de représentation est en adéquation avec l'interface muséographique présentée à la section 5.2	135
5.16	Fenêtre permettant la consultation des informations associées à l'élément sélectionné dans la scène et présent dans la base de données.	136
5.17	Fenêtre de saisie d'une annotation. L'annotation est ensuite intégrée dans la base de données et associée à un utilisateur authentifié ainsi qu'à l'objet sélectionné.	136
5.18	Vue d'ensemble du modèle 3D de la maquette Saint-Similien avec les zones découpées correspondant aux entités identifiées et renseignées dans la base de données.	138
5.19	Schéma de synthèse des travaux présentés dans cette thèse et décrivant la proposition d'un PLM muséologique couvrant les différents niveaux de la "pyramide".	139
5.20	SADT repris de (Laroche, 2007, p. 393) et complété avec les résultats de ce travail de recherche appliquée.	142
B.1	Description de l'objet patrimonial selon les vues internalistes et externalistes (Laroche, 2007, p. 255)	152
B.2	Le méta-modèle du DHRM (Laroche, 2007, p. 260)	153

B.3	La spirale patrimoniale (Laroche, 2007, p. 263)	154
D.1	Architecture du projet global (les interactions grisées ne font pas partie de l'évaluation) . .	157

Liste des tableaux

1.1	Les 3 visions de la méthode SAGACE	22
2.1	Analyse croisée des critères d'évaluation du patrimoine et des bonnes pratiques de conservation et de valorisation.	39
2.2	Comparaison non-exhaustive de base de données historiques existantes	44
2.3	Comparaison non-exhaustive de méthodes existantes de capitalisation de connaissances	46
2.4	Typologie de systèmes d'organisation des connaissances (Zacklad et Giboin, 2010) (d'après (Hodge, 2000))	48
2.5	Récapitulatif des verrous scientifiques et des problématiques de recherche	66
4.1	Exemples de projets de numérisation de maquettes urbaines ou plans-reliefs, présents dans la littérature scientifique	94
4.2	Provenance des plans-reliefs de la collection du musée des plans-reliefs à Paris. Source : http://www.museedesplansreliefs.culture.fr/collections-musee/catalogue.php	95
4.3	Tableau récapitulatif des actions possibles en fonction du profil de l'utilisateur	105
A.1	Analyse systémique globale du musée d'histoire de Nantes avec la matrice SAGACE	150
C.1	Tableau récapitulatif des (méta-)tâches à mettre en œuvre pour la patrimonialisation d'un objet d'un point de vue de la gestion de projet	155

Introduction

Contexte général

Le domaine de la muséographie numérique est en plein développement depuis plusieurs années visant à élargir les modalités d'interaction d'un visiteur avec le patrimoine. Dès lors, les outils des sciences pour l'ingénieur peuvent être "détournés" de leur fonction première et être utilisés à des fins de reconception, de conservation et de valorisation d'objets anciens. Les méthodes de numérisation 3D et de reconception de surfaces constituent un des champs d'investigation afin de pouvoir capitaliser l'objet dans son contexte. En effet, considérer un objet patrimonial seul n'a pas de sens. Il est indispensable de le recontextualiser dans son utilisation d'origine, dans ses différentes phases de vies afin de pouvoir en cerner toutes ses dimensions et toutes ses transformations. Ainsi, compte-tenu de la masse colossale d'informations hétérogènes à intégrer, l'ensemble des outils du virtuel va aider à structurer cette capitalisation. Puis, à la fin du processus de rétro-conception patrimonial, les outils et les interfaces de Réalité Virtuelle permettront de diffuser cette connaissance capitalisée. Les travaux de recherche menés conjointement par l'équipe IS3P de l'IRCCyN (Institut de Recherche en Communications et Cybernétique de Nantes, UMR CNRS 6597, École Centrale de Nantes, Université de Nantes et École des Mines de Nantes) et le CFV (Centre François Viète, Epistémologie Histoire des Sciences et des Techniques, Université de Nantes, EA 1161) ont permis d'acquérir une expérience avancée dans le domaine du virtuel pour le patrimoine :

1. depuis la numérisation de l'objet et la capitalisation des connaissances ;
2. en passant par la modélisation numérique de l'objet physique et de sa dynamique ;
3. jusqu'à sa vulgarisation dans un cadre muséal, d'expertise et d'archivage.

L'enjeu de ce processus réside dans la complémentarité des liens. Il faut une interopérabilité totale des étapes afin d'éviter la perte d'informations. Cependant, une des difficultés réside dans la complexité de vouloir généraliser la méthode. En effet chaque objet patrimonial est unique et fait appel à des connaissances, des savoir-faire ancestraux et des expertises contemporaines divers et propres à lui seul ; de plus, lorsqu'un objet est capitalisé/numérisé, la dernière étape de valorisation n'est quasi jamais connue. Aussi, il convient de capitaliser un maximum d'informations, de les organiser et les lier afin de pouvoir envisager un large spectre de possibilités de valorisation. Nos objets contenus dans les lieux de mémoire, plus communément appelés musées, ne sont pas uniquement destinés à « prendre la poussière sur une étagère ». Ils doivent devenir lieu de savoir, lieu d'appropriation de savoir-faire et porteur d'un message à destination de l'ensemble des acteurs de cet objet et pas seulement à destination du grand public ou d'une poignée d'experts. Il faut diffuser cette connaissance à une plus large population. Cela passe donc par la création d'un outil conceptuel ayant une véracité scientifique non négociable. Il s'agit là de l'objet de cette thèse CIFRE.

En 2007, une première thèse de doctorat, en co-tutelle Sciences pour l'Ingénieur et Sciences Humaines et Sociales, a été soutenue sur ce sujet ([Laroche, 2007](#)). Basée sur une allocation de recherche ministérielle, les principes méthodologiques et le modèle d'information créés ont permis d'avancer projet par projet. Il s'agit désormais de rendre ce méta-modèle opérationnel : le Digital Heritage Reference Model¹ appelé à

¹Le DHRM, Digital Heritage Reference Model, ou modèle numérique de référence pour le patrimoine est le méta-modèle proposé dans ([Laroche, 2007](#)) pour la capitalisation et la modélisation des connaissances liées au patrimoine culturel

devenir la nouvelle référence en matière de muséologie du patrimoine, étant entendu que la définition de la muséologie va de la capitalisation des objets à sa valorisation pour des experts ou pour le grand public.

Le DHRM se définit comme l'ossature générale infrastructurelle, architecturale et temporelle de la description d'une chose, d'un objet ou encore d'un processus. . . C'est une structure d'information atemporelle et adimensionnelle permettant d'encapsuler un Système Technique complexe. Le DHRM permet une description multi-temporelle (du passé vers le futur ou du futur vers le passé) ainsi qu'une description multi-dimensionnelle (de l'infrastructure vers l'architecture ou de l'architecture vers l'infrastructure). En outre, ce Système d'Information définit les étapes sur le temps long destiné à guider les acteurs du processus de patrimonialisation ; il permet la projection de la variation des états intermédiaires de l'objet technique ancien.

Mais la complexité des artefacts historiques est bien plus élevée que celle des produits issus de l'industrie manufacturière. Les modèles produits utilisés dans nos entreprises contemporaines, même si complexes et difficiles à mettre en place, prennent très rarement en compte le temps long et la multiplicité des points de vue. Il s'agit donc ici de proposer une avancée bijective où l'étude et la modélisation des objets patrimoniaux permettra d'enrichir les modèles dirigeant notre société d'aujourd'hui. À terme, l'idée est de ne pas subir la patrimonialisation d'un objet mais d'en anticiper son déclin lors de sa phase de création et d'utilisation. Si la capitalisation est anticipée dès le début du cycle de vie du produit, il en sera alors bien plus aisé de le valoriser en fin de vie. D'un point de vue industriel, la proposition est donc de rajouter les couches dédiées au patrimoine (issues du DHRM) directement au sein des Systèmes d'Information des entreprises contemporaines (gain de temps pour la suite du processus patrimonial).

L'objectif est de développer un modèle d'information et une méthode de valorisation de ce modèle au sein d'un outil permettant de pouvoir capitaliser l'ensemble des connaissances d'un objet patrimonial. Il s'agit de pouvoir réaliser un lien entre l'objet physique (généralement exposé dans un Musée), sa représentation numérique et les éléments issus de son contexte (traces ou archives) permettant d'en cerner toute sa compréhension.

Ces traces ou archives seront donc, avant tout, des données hétérogènes (historiques, techniques, économiques, etc.) qu'il conviendra de capitaliser. S'en suivra une phase de reconnaissance et de traduction temporelle ; en effet, les archives sont parfois exprimées dans un langage différent du notre, dans l'époque moderne. Il s'agit ici de définir de nouveaux moyens de compréhension des connaissances anciennes ; on ne s'orientera donc pas uniquement vers des grilles de lecture "manuelles" qui seraient superposées les unes aux autres mais vers la construction d'ontologies à encapsuler dans le nouveau système d'information. Enfin, ces éléments seront mis en interrelation afin d'être rendus intelligibles. Les connaissances formées, il faudra les stocker dans un Système d'Information dirigé par un modèle intelligent. S'agissant ici d'objets ayant suivi un temps long, les modèles mis en regard devront prendre en compte cette possibilité d'évolution et ainsi envisager d'être auto-alimentés par un méta-modèle de données. Il s'agit donc d'étudier les objets selon un nouveau Cycle de Vie qu'il conviendra de préciser. Un modèle devra diriger la base qui permettra d'encapsuler la connaissance.

Cet outil complet renseignera alors l'objet : c'est ce que nous appelons, *a priori*, le PLM² muséologique. Il pourra ensuite continuer à être alimenté par les futures connaissances acquises. Et celles-ci pourront également être consultées, valorisées, étudiées au fur et à mesure de la nouvelle vie de l'objet. L'objectif principal est de rendre l'objet patrimonial "vivant" afin qu'il soit lui-même acteur de son futur.

La maquette du port de Nantes en 1900 nous sert de support d'expérimentation. Le musée ayant décidé d'améliorer la présentation de ces objets patrimoniaux, à l'aide d'outils interactifs, pédagogiques et technologiques, le projet de revalorisation de cette maquette réalisée pour l'exposition universelle de 1900 doit pouvoir tirer profit de toutes les sources documentaires disponibles autour de l'histoire du port. Le PLM muséologique sera le cœur du système. Ainsi mis à la disposition du public de manière pratique et intuitive, ces documents permettent de mettre en place un dispositif interactif entre le visiteur, la maquette physique et la base de données (accessible sur internet) associée à la représentation virtuelle de l'objet. Le visiteur ou l'internaute pourra alors accéder directement aux connaissances capitalisées. Des

²Product Lifecycle Management – Gestion du Cycle de Vie Produit

filtres “intelligents” permettent de personnaliser l'accès à l'information selon le profil de l'utilisateur et de ses recherches.

Il s'agit d'un sujet qui servira d'expérimentation pour mettre en place une méthodologie de projets patrimoniaux plus large. En effet, la Gestion de Projets Innovants en muséographie est une discipline encore hésitante ; l'objectif de cette thèse est de fournir un nouveau cadre de référence.

Présentation du mémoire

Le chapitre 1 établit le contexte industriel à l'origine de ce travail de recherche. À partir d'une analyse systémique du fonctionnement du musée d'histoire de Nantes, deux constats permettent de caractériser les problématiques industrielles :

- Aucun processus de capitalisation des connaissances n'est dégagé lors de la conception de dispositifs muséographiques. Le recueil de données et la constitution du corpus documentaire qui suit, nécessaire à la validité scientifique du propos de médiation, sont des processus systématiques du cycle de vie de l'interface à destination des visiteurs, sans réutilisation possible ;
- Le parcours muséographique du musée est articulé autour d'un discours scientifique conçu par l'équipe de conservation et s'appuie sur les objets de collection du musée. Par conséquent, les objets exposés — au coeur du travail de conservation — présentent des similarités, des connexions pouvant être de différentes natures et garantissant la cohérence du discours.

Au travers d'un projet de valorisation d'un objet particulier des collections du musée d'histoire de Nantes, deux questions sont soulevées :

1. Comment capitaliser de manière pérenne les connaissances autour d'un objet patrimonial à des fins de conservation, de recherche et de valorisation ?
2. Comment organiser ces connaissances de manière interopérable pour assurer une gestion multi-métiers des collections du musée ?

Le chapitre 2 dresse un état de l'art au croisement des différents domaines concernés et du cadre de travail :

- Les approches méthodologiques et les besoins de la recherche en histoire ;
- Les travaux de modélisation des connaissances pouvant être adaptés au contexte de la muséologie ;
- Les outils de visualisation et d'interaction comme élément de capitalisation et d'aide à la structuration.

Le constat que nous faisons à ce point fait écho aux problématiques industrielles en soulevant les verrous scientifiques majeurs de ce travail :

1. Quel type de méthodologie outillée proposer pour la mise en place d'un système d'organisation de connaissances muséologiques ?
2. Quel méta-modèle constituer pour assurer une gestion de données dans un objectif de muséologie durable ?
3. Dans quelle mesure l'interdisciplinarité SPI-SHS implique t-elle une nouvelle approche épistémologique pour les deux champs de recherche ?

Nous démontrons dans les chapitres suivants comment répondre à ces problématiques et ainsi apporter des outils méthodologiques pour la résolution du contexte industriel. Ce chapitre se conclut donc naturellement sur la formalisation de l'apport scientifique de notre travail : la proposition d'une méthodologie outillée de capitalisation et d'organisation de connaissances historiques en contexte muséal.

Le chapitre 3 pose le cadre méthodologique de notre approche. En s'appuyant sur les cas d'étude liés au contexte industriel de la recherche, nous identifions les différents processus opérationnels nécessaires à la constitution d'un modèle de référence pour l'histoire et le patrimoine culturel.

Notre recherche bibliographique souligne l'importance des outils et méthodes du génie industriel pour aborder cette problématique. Par ailleurs, l'intérêt des technologies numériques notamment de visualisation et d'interaction (réalité virtuelle, augmentée, mixte) pour assister ces processus de manière continue est également abordé.

Le chapitre 4 décrit la finalité du travail pour la gestion des connaissances et la mise en place d'un PLM muséologique. Les propositions du chapitre 3 sont appliquées au cadre d'application industriel au travers d'un démonstrateur opérationnel pour le musée d'histoire de Nantes.

Le chapitre 5 propose un cadre théorique et pratique pour la visualisation et la manipulation de connaissances historiques. Deux démonstrateurs sont proposés : un dispositif muséographique de réalité augmentée et une application en réalité virtuelle. Il s'agit également d'évaluer la pertinence de la méthode et du modèle proposés pour assister la création du récit historique.

La conclusion page 141 enfin, établit un bilan du travail réalisé et propose quelques perspectives à explorer.

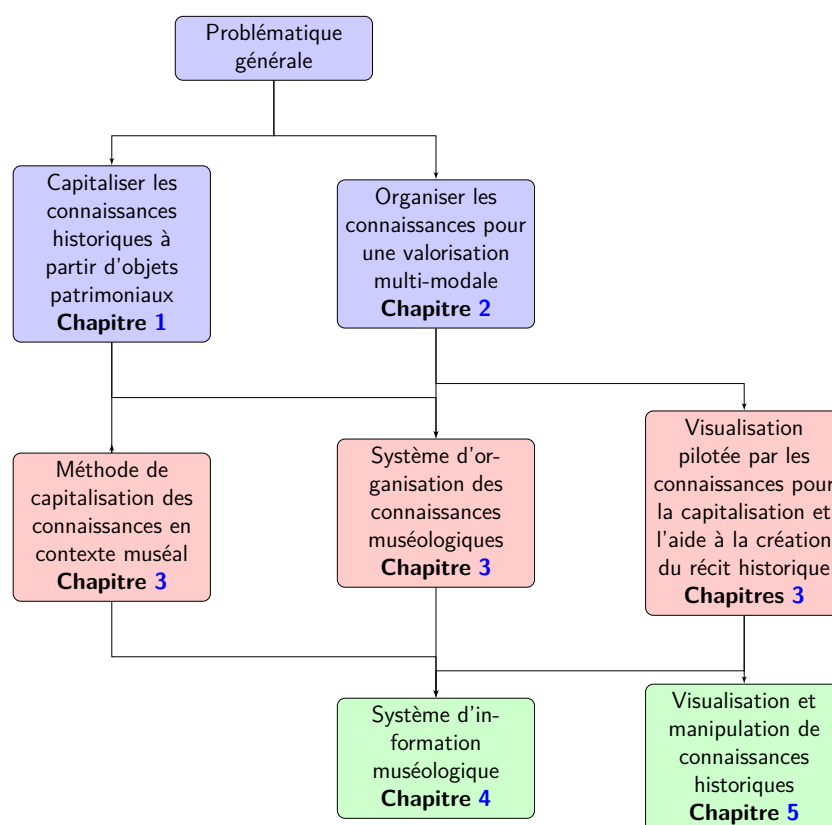


Figure 1 – Organisation du manuscrit avec le lien entre les chapitres et les problématiques

Chapitre 1

Contexte et problématique industrielle

Dans ce chapitre, nous présentons le concept de muséologie et son rapport au patrimoine culturel pour définir le cadre conceptuel de l'étude. Nous nous intéressons notamment au rôle des musées dans le processus de conservation et de valorisation du patrimoine. Nous introduisons alors le contexte industriel de cette thèse CIFRE d'abord du point de vue de l'institution muséale puis de celui d'un projet spécifique de valorisation d'un objet de collection. Le chapitre se conclut sur les problématiques que soulève une telle étude, permettant de positionner notre démarche dans ce cadre d'application.

1.1 Patrimoine culturel et muséologie

Dans cette partie, nous rappelons les enjeux essentiels liés à la question du patrimoine culturel :

- Comment définir le patrimoine ? Qu'est-ce qui fait qu'une œuvre humaine ou de la nature fait partie de notre patrimoine ?
- Comment le conserver ?
- Comment le valoriser et pourquoi ?

Pour répondre à ces questions, il est possible de s'appuyer sur les travaux de nombreuses communautés académiques ou politiques. La charte de Londres ou les principes de Séville sont des exemples de documents référents relativement récents issus des résultats de travaux de recherche. Cependant, nous pensons que l'UNESCO¹ reste la référence pour la sauvegarde et la classification du patrimoine.

La gestion du patrimoine culturel mondial est en effet au coeur des recommandations de l'UNESCO telle que définies dans sa *Convention du patrimoine mondial* de 1972. Le patrimoine culturel et naturel, en

¹United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization est une institution de l'ONU, Organisation des Nations Unies, créée le 16 novembre 1945 dont l'objectif est défini comme

contribuer au maintien de la paix et de la sécurité en resserrant, par l'éducation, la science et la culture, la collaboration entre nations, afin d'assurer le respect universel de la justice, de la loi, des droits de l'homme et des libertés fondamentales pour tous, sans distinction de race, de sexe, de langue ou de religion, que la Charte des Nations Unies reconnaît à tous les peuples

Source : http://www.unesco.org/archives/new2010/fr/histoire_unesco.html

tant que bien commun est nécessaire pour la construction et la compréhension de notre société (UNESCO, 2011). Cependant, il est extrêmement complexe de statuer sur ce qui fait patrimoine, et donc sur les critères de décision pour le classement d'un artefact, d'un monument ou d'un savoir-faire.

En 1903, Aloïs Riegl, historien autrichien, proposait par exemple les valeurs d'historicité et d'ancienneté comme caractéristiques du patrimoine monumental (Riegl, 1984). Le patrimoine est pour l'auteur une mémoire voulue, désigné par nous.

Aujourd'hui, l'UNESCO distingue deux types de patrimoine culturel :

1. Le patrimoine matériel culturel (monuments, ensembles, sites) et naturel
2. Le patrimoine culturel immatériel depuis 1996

L'UNESCO a également proposé depuis 2003 une charte relative à une nouvelle catégorie : le patrimoine numérique. En effet, de nombreuses formes de représentation de la connaissance humaine sont désormais nativement produites sous forme numérique. Cela illustre bien l'évolution de la notion de patrimoine, intrinsèquement liée à l'évolution de notre société.

DAVALLON explique d'ailleurs dans (Davallon, 2002) comment les traces de notre passé acquièrent la valeur patrimoniale selon un processus de patrimonialisation qualifié de « filiation inversée » et basé sur les critères suivants :

- la découverte d'une trouvaille, disparue de la vue des hommes
- la certification de l'objet d'origine, permettant de s'assurer que l'objet provient bien de son monde d'origine. Pour cela, il faut donc que le savoir sur cet objet permette d'établir son origine
- la preuve de l'existence du monde d'origine, c'est-à-dire certifier l'authenticité de l'objet. L'auteur prend pour exemple le cas de la grotte Chauvet en Ardèche : la découverte et la datation de la grotte ne permettent pas de lui attribuer une valeur de patrimoine authentique si nous n'avons aucune connaissance de la préhistoire. Il s'agit donc ici de « rétablir une continuité entre nous et ce monde d'origine »
- la représentation du monde par l'objet, celui-ci étant devenu un témoin physique du lien entre le passé et le présent
- la célébration par l'exposition, permettant de percevoir pour tous le lien de parenté avec les hommes du passé
- la transmission aux générations futures, dernière étape essentielle au processus de patrimonialisation. En effet, la découverte de ces œuvres, devenues patrimoine, nous donne le devoir d'assurer la continuité entre le passé et le futur.

Dans ce contexte, le rôle des musées, défini par l'ICOM² comme « institution permanente, sans but lucratif, au service de la société et de son développement », ouverte au public, et qui fait des recherches concernant les témoins matériels de l'homme et de son environnement, acquiert ceux-là, les conserve, les communique et notamment les expose à des fins d'étude, d'éducation et de délectation» (ICOM, 2007) est crucial. L'ICOM existe d'ailleurs depuis 1946 et est formellement lié à l'UNESCO.

D'après cette définition, le rôle du musée est complexe dans le sens où la gestion du patrimoine implique de nombreux processus et compétences. Compétences d'ailleurs largement transdisciplinaires puisque la nature des objets est extrêmement hétérogène, notamment pour les objets techniques.

Il semble donc nécessaire ici de définir la notion de muséologie et son apport pour le patrimoine. Voici la définition proposée par Georges-Henri Rivière dans (Rivière, 1989) :

Une science appliquée, la science du musée. Elle en étudie l'histoire et le rôle dans la société, les formes spécifiques de recherche et de conservation physique, de présentation, d'animation et de diffusion, d'organisation et de fonctionnement, d'architecture neuve ou muséalisée, les sites reçus ou choisis, la typologie, la déontologie.

²L'ICOM, conseil international des musées, est une organisation non-gouvernementale, associant les professionnels de musée du monde entier.

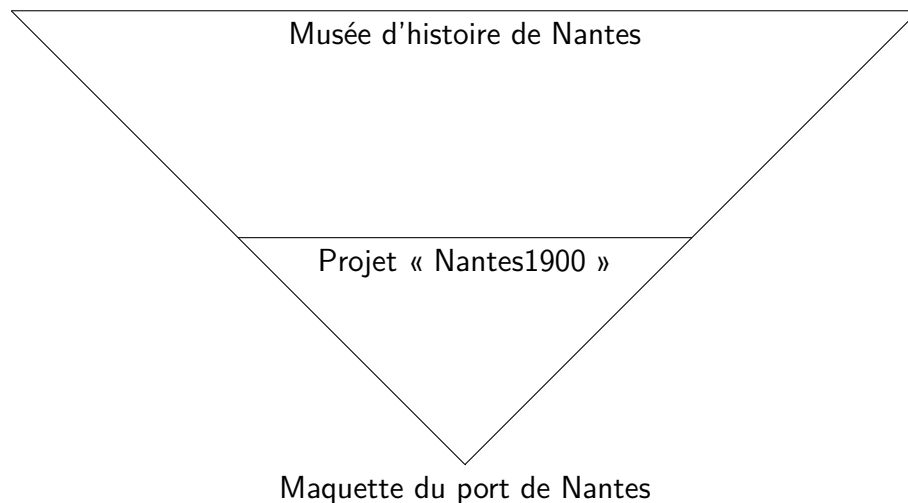


Figure 1.1 – Organisation du chapitre

Aujourd'hui où le rôle des musées est bouleversé par l'apparition des technologies numériques, faisant la part belle aux appropriations par le public et aux nouvelles formes d'expression ³, cette définition est toujours d'actualité et c'est à celle-ci que nous nous rapporterons pour la suite de ce manuscrit.

Dans la suite de ce chapitre, je présenterai donc l'enjeu muséologique dans le cas du musée d'histoire de Nantes, à travers son organisation, le contexte du projet de recherche et enfin les problématiques industrielles. Nous détaillerons donc ici les spécificités liées au contexte industriel de ces travaux et à l'objet d'étude patrimonial qui s'y rapporte.

1.2 Contexte industriel

Entre conservation et diffusion, nous l'avons vu, les missions des musées sont multiples. Pour répondre à l'exigence toujours renouvelée des visiteurs, et pour améliorer leur attractivité, les musées cherchent aujourd'hui à se positionner en terme d'offre d'accès au patrimoine. En parallèle, les dispositifs muséographiques ont une durée de vie longue, tandis que les contenus changent peu. De plus, la typologie des visiteurs de musée est extrêmement hétérogène, tant sur les connaissances que sur les attendus. Enfin, la collecte et la validation des informations est une part coûteuse dans la réalisation de dispositifs muséographiques, ce qui pousse les institutions à s'orienter vers une meilleure gestion et une réutilisation de ces contenus pour diminuer les coûts. Il s'agit donc d'optimiser la conception de dispositifs pour répondre à une exigence scientifique constante, tout en accordant une place prépondérante à la diffusion des connaissances auprès du public.

Ce travail s'inscrit donc à la fois dans une perspective de capitalisation des connaissances, au sens industriel du terme, et dans une optique d'accès multi-niveaux à l'information en vue d'une restitution dans un cadre muséographique. La méthodologie envisagée permettra une gestion de ces informations au sein d'un système d'information global pour le musée. En plus du processus de rétro-conception dédié aux objets patrimoniaux de ce type (plans-reliefs) rendu le plus automatisé possible, la ré-utilisation des connaissances capitalisées pour d'autres formes de médiation sera ainsi facilitée.

Ce chapitre focalise d'abord le discours sur le cas du musée d'histoire de Nantes, avec une analyse systémique de son fonctionnement global, puis sur certaines modalités qui intéressent le présent sujet de recherche, à savoir : la place du numérique dans la médiation culturelle et scientifique, mais également la mise en relation des connaissances autour des objets de collection d'une part et des métiers de l'entreprise

³On pourra citer par exemple le groupement Muséomix <http://www.museomix.org/> qui propose de repenser le fonctionnement du musée et du rôle du public à son égard par le biais d'événements annuels. Les participants sont amenés à construire un projet expérimental de valorisation d'un objet muséal.

d'autre part.

1.2.1 Le château des ducs de Bretagne — Musée d'histoire de Nantes

Organigramme

Le château des ducs de Bretagne a une organisation hiérarchique très horizontale, orientée projets. En effet, 6 services constituent le socle de fonctionnement :

- Conservation
- Publics
- Projets numériques
- Éditions
- Technique
- Expositions temporaires

À ces services s'ajoutent le directeur et conservateur en chef du musée, ainsi qu'un chargé de programmation artistique, un chargé du développement de l'offre aux publics et un chargé du développement scientifique. Cette organisation souligne l'importance à la fois du travail scientifique de fond et de l'offre aux publics.

Une analyse systémique, réalisée avec la méthode de modélisation SAGACE⁴ permet d'identifier les différents composants essentiels qui permettent le fonctionnement du musée en tant que système complexe.

La méthode SAGACE est basée sur une matrice à 9 points de vue (cf. figure 1.1), illustrant 3 visions (fonctionnelle — ce que fait le système, organique — ce qu'est le système, et stratégique — ce que décide le système) du système. Ces visions sont décrites selon trois éléments qui varient selon la vision.

	Activité	Fonctionnement	Évolution
Vision fonctionnelle	Processus	Programme	Scénarios
Vision organique	Réseau opérant	Réseau logistique	Réseau auxiliaire
Vision stratégique	Pilotage	Adaptation	Anticipation

Table 1.1 – Les 3 visions de la méthode SAGACE

Une fois la matrice modélisée (voir Annexe A), celle-ci constitue un référentiel de compréhension et d'action pour le fonctionnement du musée. Dans le cadre de nos travaux, cette matrice nous sert de référence pour la représentation conceptuelle des activités et du fonctionnement du musée afin d'identifier le périmètre d'intervention sur lequel nous pouvons agir. De cette analyse systémique, voici les principales informations à noter :

- Pour remplir sa mission de musée telle que définie par l'ICOM, celui-ci s'appuie principalement sur une organisation horizontale, ou organisation en projets. Ainsi, chaque nouveau projet (exposition temporaire, dispositif muséographique, programmation d'événement pour le public, etc.) s'appuie sur les compétences des différents services et sur les moyens techniques à disposition. En effet,

⁴SAGACE est une méthode de modélisation systémique, développée par le Comité à l'Énergie Atomique, pour la représentation de connaissances statiques décrivant un système de production

chaque service apporte une expertise différente et cette interdisciplinarité est nécessaire pour le bon déroulement des opérations.

- Pour assurer le bon fonctionnement des activités, le musée utilise des moyens internes et externes. La gestion du site en terme de sécurité et d'hygiène par exemple est confiée à des partenaires extérieurs alors que la maintenance technique des installations et la gestion des ressources humaines sont pilotées en interne.
- Enfin, les questions de prospective et de stratégie sont menées encore une fois conjointement par les différents services selon leur expertise. À cela s'ajoute des ressources dédiées spécifiquement au développement scientifique et à la politique des publics. Ce mode de fonctionnement permet d'adapter rapidement et efficacement la stratégie du musée en fonction des retours d'utilisateurs ou des besoins émergents.

Discours scientifique

Le parcours muséographique dans le musée est découpé en 7 séquences et s'effectue à travers 32 salles, illustrant l'histoire de Nantes depuis le moyen-âge jusqu'à aujourd'hui. Ainsi, le parcours est chronologique mais également thématique. Il est ainsi possible de programmer différentes visites par exemple pour des groupes scolaires différents.

Système de gestion des collections

Au coeur du fonctionnement du musée se trouvent les collections : ensemble d'objets liés à l'histoire de la ville. Le musée d'histoire de Nantes a comme particularité que les objets présentés en son sein ont été choisis par l'équipe de conservation pour illustrer et servir le discours scientifique et historique. Par conséquent, la part la plus importante des objets de la collection du musée se trouve dans les réserves : sur les quelques 35000 objets de collection que possède le musée, seulement 800 objets environ sont exposés, soit un peu plus de 2%.

Afin d'inventorier l'ensemble de ces objets, un outil de gestion informatisé des collections (logiciel AdLiB) centralise les informations qui leur sont liées. Cet outil propriétaire est utilisé pour créer de nouvelles entrées (voir figure 1.2) lors de l'acquisition de nouveaux objets (c'est le cas lors des dons de particuliers pour les expositions temporaires par exemple), les mettre à jour et accéder à ces informations. Ce système fonctionne à l'aide d'un thésaurus réalisé par l'équipe de conservation, et propre à la collection du musée, contenant la terminologie des termes utilisés pour classer les différentes objets. Le standard SPECTRUM⁵ est utilisé pour la gestion des méta-données.

L'identifiant unique attribué à chacun des objets de collection s'appelle le numéro d'inventaire : il se compose d'une série de chiffres faisant mention de l'année d'intégration dans les collections, et de sa position dans la série d'objets inventoriés selon le principe suivant :

$$N^{\circ} \text{inventaire} = \text{annee.serie.numero(partie)}$$

La série correspond par exemple à un don d'un particulier. Chaque objet étant collecté au sein de cette série se voit alors attribuer un numéro, et, si l'objet en question est composé de plusieurs parties, chaque partie est spécifié entre parenthèses. Exemple : 2014.25.1(3) correspond à la troisième partie (dans le cas d'un catalogue par exemple) du premier objet de la 25^e série de l'année 2014.

En plus de ce système de gestion de collection, trois autres systèmes gèrent la documentation :

- La photothèque
- Le centre de documentation

⁵SPECTRUM est un standard de documentation conçu pour les musées anglo-saxons et supporté par la *Museum Documentation Association* Source : www.jiscdigitalmedia.ac.uk/guide/metadata-standards-and-interoperability. En France, le format UNIMARC (acronyme pour UNiversal MARC) développé par l'IFLA (*International Federation of Library Associations and Institution*) est le format officiel d'échange de l'information bibliographique et le format de travail du Sudoc (Système universitaire de documentation) et de la plupart des bibliothèques publiques.

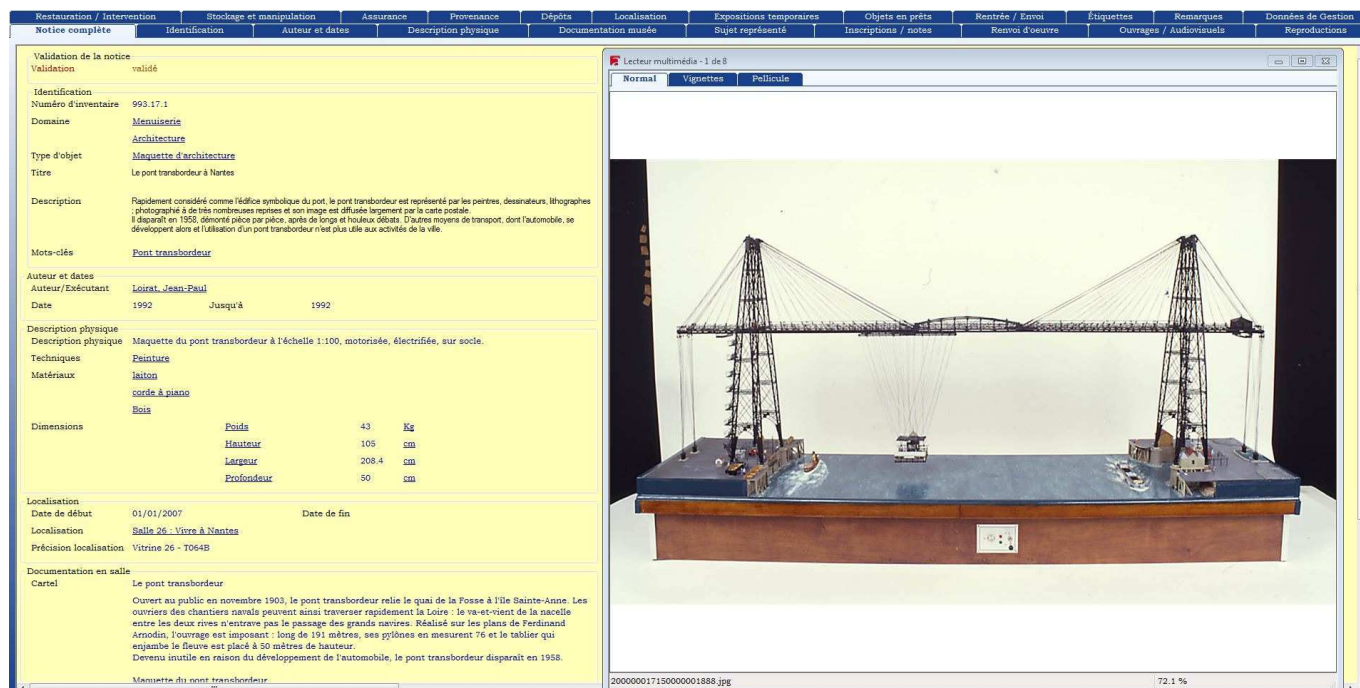


Figure 1.2 – Exemple de la notice AdLib associée à la maquette d'architecture du pont transbordeur présentée salle 26 du musée d'histoire de Nantes

■ La bibliothèque

La photothèque regroupe l'intégralité des documents numérisés et a différentes fonctions :

1. Indexer l'ensemble des images
2. Stocker ces images
3. Exploiter ces images pour la vente, l'illustration d'ouvrages ou la reproduction d'œuvres.

La photothèque est le système d'information dédié à l'archivage des objets (tableaux, estampes, gravures, cartes postales, photographies) numérisés. Chaque cliché est un fichier au format TIFF⁶ contenant des méta-données IPTC⁷ et dont le nom de fichier correspond au numéro d'inventaire pour les clichés haute définition.

Elle contient actuellement plus de 13 000 images en haute définition (au moins 4000 pixels de large et une résolution de 360 pixels par pouce).

Le nom du fichier image est formalisé comme suit :

NomFichier = N°inventaire.InitialesPhotographe.N°serie où le photographe désigne la personne ayant procédé à la numérisation de l'objet.

Le processus de numérisation étant long, l'intégralité du contenu de la photothèque n'est pas disponible en haute définition. Pour les images en basse et moyenne définition, le nom de fichier ne correspond pas à la désignation ci-dessus car provient d'une migration logicielle de l'ancien outil de gestion. Il faut alors faire une recherche manuelle dans le logiciel AdLib pour obtenir le nom de fichier correspondant.

Puis, chacun de ces documents numérisés est indexé⁸ à l'aide du logiciel Adobe®Bridge selon le processus suivant :

- ajout des métadonnées IPTC, notamment les coordonnées du créateur, permettant d'identifier l'image comme propriété du musée

⁶Tagged Image File Format est un format de fichier pour image numérique, dans le domaine public depuis 1992

⁷IPTC Core est un standard de métadonnées pour les images de presse

⁸À l'heure actuelle, environ 15% des documents ont été indexés, soit un peu plus de 2000 images

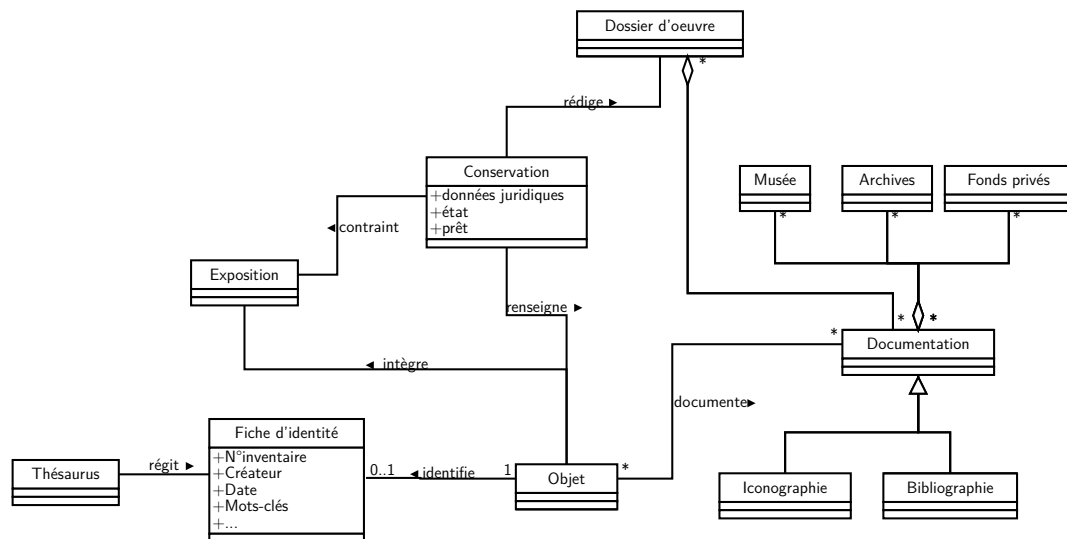


Figure 1.3 – Modèle simplifié de l'objet en contexte muséal et des activités associées

- copie des métadonnées provenant du logiciel de gestion des collections AdLib pour les données de description (titre, description physique et iconographique, datation, etc.)
- indexation iconographique supplémentaire via l'ajout de mots-clés descripteurs. Cette étape nécessite une confrontation avec le thésaurus et implique une éventuelle décision de mise à jour de celui-ci.
- ajout de métadonnées de localisation relative à la présence de l'objet dans le musée (exemple du numéro de salle)
- ajout de métadonnées liées à l'utilisation de l'image (pour des expositions par exemple)

À l'heure actuelle, les deux processus métiers que sont l'indexation des fichiers numérisés dans la photothèque et l'intégration des données dans le système de gestion des collections sont manuels et fonctionnent en parallèle avec les inconvénients que cela implique, notamment la sur-indexation des contenus (informations redondantes entre les bases de données) et un manque d'interopérabilité entre les deux systèmes.

La figure 1.3 établit une synthèse des informations à gérer pour le cycle de vie muséal d'un objet patrimonial. Ces informations peuvent être classifiées en trois catégories :

- la **fiche d'identité** permet de décrire de manière scientifique l'objet en question : sa provenance, son type, ses caractéristiques. Cette description s'effectue avec le support d'un **thésaurus** spécifique servant de référence pour l'utilisation du vocabulaire.
- la **documentation** rattachée à l'objet : documents iconographiques pouvant provenir d'autres objets numérisés eux-mêmes décrits et gérés au sein de la photothèque, documents textuels identifiés par leur référence bibliographique, et éventuellement des documents multimédias (films d'archives, archives sonores provenant d'entretiens, etc.). Cette documentation peut s'enrichir au fil des expositions (collectes d'objets, entretiens, etc.)
- l'organisation de la vie muséale : la gestion de la **conservation** de l'objet avec les contraintes inhérentes à l'**état** de l'objet, à ses propriétés physiques, ainsi que la gestion de l'**exposition** de l'objet (prêts, éléments techniques et visuels de scénographie, expositions durant lesquelles l'objet a été présenté). Pour la gestion de la conservation, est associé à chaque objet (utile notamment pour les récolements) et peut alors contenir des **représentations** intermédiaires virtuelles de l'objet (sous la forme de fichiers 3D ou 2D) décrivant l'état de l'objet à une date donnée.

L'ensemble de ces informations constitue le dossier d'œuvre de l'objet.

Cette structuration permet aux différents services compétents du musée et donc aux différents métiers d'intégrer les informations relatives à la gestion de l'objet patrimonial et d'y accéder ou d'y donner accès

(pour les inventaires ou les récolements décennaux).

1.2.2 Contexte du projet

Ce projet de recherche fait suite aux initiatives menées depuis 2008 en collaboration avec deux laboratoires universitaires nantais (l'IRCCyN à l'École Centrale de Nantes (UMR CNRS 6597) et le Centre François Viète d'histoire des sciences et des techniques à l'Université de Nantes (EA 1161)) avec la S.P.L.⁹ Le Voyage à Nantes ; plus particulièrement le Musée du château des Ducs de Bretagne qui en dépend, lieu dédié à l'histoire urbaine de Nantes et labellisé « Musée de France ». Le musée affiche également la marque « Qualité Tourisme™ » créée par le ministère chargé du tourisme ainsi que le label « Tourisme et Handicap ».

À l'origine, le projet « Nantes 1900 » s'inscrit dans la volonté de mieux connaître et de valoriser un objet patrimonial exposé dans le musée : la maquette du port de Nantes en 1900.



Figure 1.4 – Maquette du port de Nantes en 1900 dans la salle 21 du musée d'histoire de Nantes. Crédits : Musée d'histoire de Nantes

L'objet concerné, un plan-relief réalisé en 1899 par Pierre-Auguste Duchesne, à l'heure où Nantes se voulait un grand port de la façade Atlantique, a été commandé par la chambre de commerce de la ville de Nantes afin de valoriser son image maritime pour l'exposition universelle de 1900 (Guillet *et al.*, 1999; Naegel, 2011). Régulièrement mise à jour jusqu'à la Première Guerre, elle fut ensuite donnée à la Ville de Nantes et est devenue une pièce maîtresse des collections municipales.

⁹Société Publique Locale

Le port de Nantes

Au cours de l'histoire, la ville de Nantes a toujours été un important port de l'océan Atlantique. Située au bord de la Loire, en fond d'estuaire, Nantes profite de ses échanges portuaires et maritimes pour développer une longue tradition de construction navale mais également des industries importantes centrées autour des activités mécaniques, métallurgiques ou agroalimentaires, sans oublier la chimie autour des engrais. Au XIX^e siècle, la ville a connu un formidable essor grâce au développement des activités industrielles. À la fin du siècle, au moment où les possibilités de navigation y paraissaient confortées grâce au Canal maritime de la Basse-Loire, ce grand canal latéral qui était censé résoudre pour longtemps les difficultés de navigation de la partie centrale de l'estuaire, la chambre de commerce de la ville décida de commander une maquette du port pour en démontrer les qualités et le dynamisme, et en faire ainsi la promotion. Pour l'Exposition Universelle de 1900 dans le cadre d'un pavillon collectif de dix-sept chambres de commerce associées, le choix fut fait de présenter un plan-relief en raison de l'accessibilité et de la facilité de lecture pour le grand public.

La maquette du port de Nantes est ainsi établie et construite en 1899, par Pierre Auguste Duchesne (1841-1933), un maquettiste modelleur nantais connu pour ses différentes maquettes. De dimensions très importantes, le plan-relief du port de Nantes en 1900 mesure 9,2 mètres de long et 1,85 mètre de large. Il est constitué de seize morceaux assemblés en joints apparents. Construit essentiellement en bois, il comporte quelques éléments de finition en métal, fibres végétales, papier et verre. L'échelle est d'environ 1 : 450 (pour une comparaison de référence : les lampadaires des rues ont un diamètre de 1 millimètre sur la maquette).

La maquette entière représente approximativement 9,5 km² du port et de la ville de Nantes. Elle présente, par exemple, les entreprises installées autour de la Loire pour la construction navale, où plusieurs sites industriels sont ainsi représentés¹⁰, et illustre la nouvelle disposition de l'estuaire après d'importants travaux d'aménagement du territoire.

Le plan-relief a connu des évolutions régulières jusqu'en 1913 mais on ne connaît pas précisément la date de l'agrandissement vers l'aval. La maquette accompagne la transformation du site naturel en site industriel, l'aménagement de la pointe aval de la Prairie aux Ducs avec l'achèvement du quai des Antilles avant 1905 puis du quai sud, devenu le quai Wilson après la Première Guerre mondiale ; il suffit aussi de constater, en ce qui concerne les outillages et les superstructures, l'existence du pont transbordeur, qui date de 1903, celle de la grue portique de 30 tonnes, installée à l'origine sur le quai des Antilles en 1906. Les évolutions plus importantes des canaux et de leurs comblements sont également visibles : il en est ainsi du canal Pelloutier dont l'équipe de conservation du Musée a pu reconnaître le tracé ancien sous une langue de bois installée sur la maquette pour représenter la nouvelle rue. Le plan, dans son actualité, reflétait ainsi la transformation et la modernisation du port. Ce souci d'être au plus près de la réalité portuaire était, bien entendu, une aspiration des dirigeants de la chambre de commerce afin que cet outil de communication, que constituait le plan en relief, puisse servir aux intérêts de la chambre.

Les transformations et la modernisation du port s'accélérent après 1918 : la maquette, n'étant plus mise à jour, n'est désormais plus l'outil de communication convenable pour la chambre de commerce. Elle l'est d'autant moins à la fin des années 1920 que les comblements des bras nord de la Loire s'annoncent et préfigurent un changement radical et durable du paysage du centre-ville. Telle quelle, elle n'est donc plus utile pour l'actualité de la ville mais le reste encore pour ce qui en fait désormais l'histoire. La maquette devient un objet de collection muséale, désormais patrimonialisé. Le président de la chambre de commerce Delafoy présentait ainsi le projet de donation du plan du port : il « constitue une pièce de musée qui présentera pour les générations futures un grand intérêt et peut donc être offert au musée de la ville ».

Le plan en relief fut donc offert à la Ville de Nantes, qui accepta le don le 11 mai 1928 pour être présenté au deuxième étage du musée de Nantes par l'image. Il est ainsi exposé jusqu'à la fermeture de

¹⁰La construction navale occupe une place importante au début du XX^e siècle. Parmi les sites industriels présents sur la maquette, on peut citer les Ateliers et Chantiers de la Loire et les Ateliers et Chantiers de Bretagne tous deux implantés sur l'île de la Prairie au Duc, ainsi que les chantiers Dubigeon à Chantenay

ce Musée à la fin des années 1960. Lorsqu'il est remonté en 1974 au musée des Salorges dans le bâtiment du Harnachement, au Château des ducs de Bretagne, sa présentation diffère légèrement de la précédente. En effet, il n'est plus possible pour le visiteur d'accéder aux différents points de vue que pouvait proposer le plan en relief, celui-ci étant dorénavant présenté en oblique le long d'un mur.

Il est de nouveau démonté en 1994, lors de la fermeture du musée des Salorges dans le cadre de la restructuration du château et de la constitution du futur musée d'histoire de la ville de Nantes. Durant les années 1996 et 1997, le plan est restauré par l'Atelier régional de Kerguehennec, spécialisé dans la restauration des bois polychromes, afin de restituer le dispositif de présentation et de stockage d'origine, passablement perturbé lors de la présentation au musée des Salorges. Le plan en relief est ainsi exposé, fidèlement à sa présentation d'origine, durant l'exposition « Estuaire, de Nantes à Saint-Nazaire, histoire d'un port » au musée du Château des ducs de Bretagne.

La restauration a mis en lumière plusieurs indices permettant une meilleure compréhension de sa fabrication et de son usage. Si la restitution des différents morceaux d'origine nous indique la qualité de modularité du plan en relief en fonction de l'exposition souhaitée, la restauration a surtout bien montré qu'il avait subi, durant sa période d'emploi, de nombreuses adaptations liées à l'évolution du site.

Un objet muséographique *in vitro*

Depuis la réouverture du Musée en février 2007, la maquette est présentée sous vitrine dans la salle 21, dédiée au tournant industriel et portuaire de Nantes autour de 1900. Cette maquette suscite l'intérêt des visiteurs¹¹ (Le Cloarec et D'Haene, 2007).

Cet objet est actuellement placé sous vitrine, presque inerte, pour des raisons évidentes de conservation (poussière, visiteurs, etc.). Il est pourtant porteur de sens profond car il permet d'expliquer le dynamisme industriel avec lequel la ville de Nantes s'est développée. Par ailleurs, si la maquette a été réalisée pour un sens de lecture Ouest-Est, elle est exposée dans le sens Est-Ouest. S'ajoutent à cela les contraintes d'accessibilité et de sécurité si bien qu'il n'est possible d'observer la maquette que du Sud vers le Nord et de l'Est vers l'Ouest. Certains éléments visuels comme les noms d'entreprise peints sur les toits des entrepôts ne sont ainsi plus visibles. De plus, cette lecture est réductrice pour la compréhension de l'organisation du territoire.

Le musée a ainsi décidé d'envisager de nouvelles formes de valorisation aussi bien d'un point de vue scientifique que muséographique. Souhaitant que la valorisation de cette maquette soit innovante, l'utilisation des NTIC « nouvelles technologies de l'information et de la communication » ou plus précisément les technologies numériques a été envisagée. La solution devra aider à la compréhension de la maquette, et du territoire qu'elle représente notamment au niveau du fonctionnement de la ville et du port en 1900. Le dispositif permettra d'accéder aux données historiques à l'aide d'un outil multimédia permettant de renforcer le discours muséographique ; il s'agit ici de permettre une meilleure compréhension des objets patrimoniaux par l'exploitation des connaissances virtuelles associées, aussi bien à destination du grand public que d'experts ou d'institutions.

D'un point de vue scientifique, une des problématiques est d'étudier dans quelle mesure il est possible de constituer un récit historique à partir d'un objet muséographique. Cette démarche épistémologique est au cœur du travail présenté ici.

L'enjeu réside donc dans la mise en place d'un nouveau Système d'Information à vocation patrimoniale qui se doit d'être pérenne sur le temps long (50 ans) en permettant une encapsulation de données hétérogènes.

1.2.3 L'usage du numérique au musée d'histoire de Nantes

Depuis 2007 et la réouverture de musée d'histoire de Nantes après rénovation du château, classé monument historique, les technologies numériques sont utilisées comme un moyen efficace de valoriser les collections

¹¹Pourtant, seul un cartel est proposé comme source d'information à destination du public (lors des visites libres)

et d'ajouter en interactivité aux dispositifs existants.

Ainsi, outre l'utilisation de la haute définition pour la projection des films et les bornes interactives, les technologies tactiles ont fait leur apparition pour remplacer les interfaces de consultation des bornes du musée. Le virtuel a également fait son entrée en 2007 au musée avec le dispositif « Nantes en 1757 » qui permet d'explorer 11 quartiers de Nantes reconstitués à partir du fonds d'archives. Le succès de ce dispositif valide l'intérêt d'un point de vue muséographique de ces outils en complément des objets de collections exposés.

Cependant, une des leçons tirées de ce dispositif et qui constitue une part de la problématique industrielle concerne l'accès au corpus historique. En effet, si la réalisation de l'application « Nantes en 1757 » s'est appuyée sur des recherches scientifiques minutieuses dans les archives¹², le corpus constitué pour l'occasion n'est plus exploitable. Sans parler des problématiques d'obsolescence technologique, il est donc impossible de mettre à jour le contenu de l'application ou bien d'exploiter le contenu à d'autres fins.

Le coût de recherche étant considérable en temps et en moyens financiers, il est devenu impossible pour le musée de mettre en place plus de dispositifs de ce type sans repenser le mode de capitalisation des connaissances accumulées. Si la spécificité des objets patrimoniaux nécessite une gestion adaptée au cas par cas, il est cependant utile de s'appuyer sur un système d'information à partir duquel les différentes interfaces pourront extraire les données adéquates.

Néanmoins, ce renouvellement constant des technologies est essentiel pour suivre l'évolution des pratiques du public mais suppose de pouvoir s'appuyer sur des méthodes reproductibles et des contenus capitalisés pouvant être exploités. Enfin, il faut également mettre à jour les compétences et mettre en place des évaluations des dispositifs créés. Comme nous l'avons vu plus tôt, cette problématique d'utilisation du numérique suppose une gestion transversale des projets, à l'intersection des services technique, des publics et des projets numériques.

Un partenariat avec des chercheurs d'équipes extérieures permet également d'avoir un regard critique sur la place du numérique et sur l'appropriation des dispositifs par le grand public. Des études sont ainsi menées régulièrement ([Hadid et al., 2012](#)).

1.3 Problématiques industrielles

L'objectif muséographique est donc double : introduire un dispositif interactif permettant au public d'accéder à l'ensemble des connaissances disponibles sur l'objet tout en permettant à l'équipe de médiation d'enrichir le discours¹³ par le biais du numérique. Cela permettra de préparer la possibilité d'un prolongement de la visite hors les murs du musée entre monde réel et monde virtuel. La collecte d'informations étant un processus long et coûteux en moyens financiers et humains, l'approche permettra également d'optimiser ce processus pour l'institution.

Les problématiques identifiées concernent principalement la nature des informations et des processus à prendre en compte. En effet, nous avons vu que la gestion des objets patrimoniaux est particulièrement complexe et pluridisciplinaire. On peut donc résumer les principales difficultés à la résolution des problématiques industrielles comme suit :

- La typologie des objets manipulés (objets, documentation, images)
- la diversité des acteurs (internes et externes)
- La formalisation des processus en place (chaîne de validation des notices, vie des objets, recherche d'informations)
- L'interopérabilité du système de gestion actuel

¹²Le positionnement précis dans le monde virtuel des éléments de voirie tels que les lampadaires a par exemple été possible grâce à l'analyse des appels d'offre de l'éclairage public de l'époque.

¹³Les discours sont adaptés aux publics effectuant la visite : scolaires — selon l'âge, groupes, étrangers, handicaps, etc.

Une approche multi-dimensionnelle est donc essentielle, tant pour la gestion des données produits liées aux objets (temporalités, échelle spatiale, niveaux de détails) que pour la gestion des processus métiers (conservation, écriture du récit historique, visualisation des données).

Nous faisons alors une première hypothèse :

Hypothèse : La méthodologie de patrimonialisation d'un objet muséographique permettrait de capitaliser les connaissances au cours du processus de conception de dispositifs muséographiques et ainsi d'assurer la reproductibilité de la méthode.

Cette hypothèse est annoncée comme un postulat et la suite de ce manuscrit s'attachera à apporter des éléments de démonstration pour la valider.

1.4 Positionnement de la thèse

Ce travail de thèse vise donc à mettre en place une méthodologie reproductible et outillée de capitalisation et de gestion des connaissances historiques dans un contexte muséal. La méthodologie doit englober le processus global de patrimonialisation, depuis l'acquisition des données jusqu'à leur valorisation. Le livrable industriel de ce travail consiste donc à formaliser ce nouveau processus de gestion des connaissances et d'en démontrer la validité scientifique à travers la mise en place du dispositif muséographique final, dédié à la valorisation de la maquette du port de Nantes du musée.

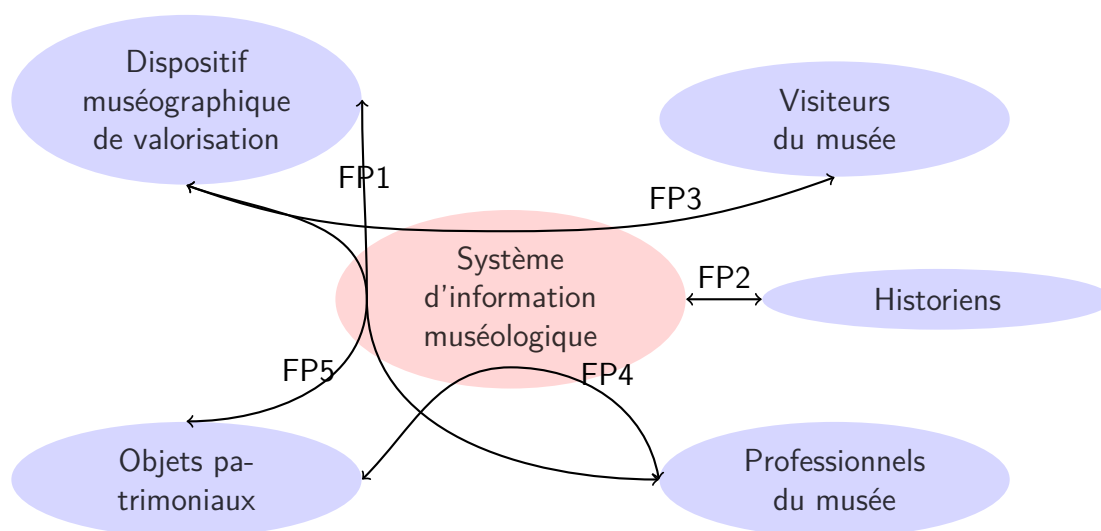


Figure 1.5 – Analyse fonctionnelle externe du système d'information attendu

Pour la conception du dispositif muséographique final, un cahier des charges fonctionnel (voir annexe G) a été rédigé par Christophe Courtin (responsable du service des projets numériques au musée d'histoire du château des ducs de Bretagne) et moi-même. Néanmoins, ce cahier des charges concerne uniquement la réalisation du dispositif technologique et intègre des éléments de conseil sur la conception, en lien avec les travaux scientifiques présentés dans ce manuscrit.

Afin de répondre à ce besoin muséologique des musées d'histoire en particulier, l'approche envisagée consiste à s'appuyer sur les méthodes et les outils du génie industriel et des sciences de l'ingénieur pour la conception du système d'information dédié au pilotage des interfaces de médiation.

La figure 1.5 résume de manière concise les fonctionnalités du système d'information attendu et des éléments extérieurs s'y rapportant. Parmi les fonctions connues du système, on peut citer :

- FP 1 : piloter le fonctionnement des interfaces de médiation (accès, modification des contenus)

- FP 2 : capitaliser les connaissances historiques liées aux objets patrimoniaux
- FP 3 : améliorer la valorisation des collections
- FP 4 : interagir avec le système de gestion des collections pour le suivi de la vie patrimoniale des objets
- FP 5 : optimiser la conception des outils de médiation

Une évaluation du dispositif muséographique, réalisée en partenariat avec les équipes du musée sera présentée au chapitre 5 et détaillée dans les annexes D et E. De cette manière, la rétro-action finale en terme d'accès à l'information et d'acquisition de connaissances par les visiteurs du musée pourra être validée. Valider cette phase finale permettra d'en déduire les éléments de validation des phases amont. En effet, l'évaluation positive du dispositif muséographique couplé à une base de connaissances, en terme de réponse à la problématique industrielle, nous donne des éléments de validation de la méthodologie scientifique proposée.

Chapitre 2

Formalisation et valorisation des connaissances historiques

Nous proposons dans ce chapitre un tour d'horizon des travaux scientifiques en lien avec la problématique industrielle. Cet état de l'art s'intéresse notamment aux lignes directrices proposées par les institutions ou groupes de recherche référents dans le domaine de la conservation et de la valorisation du patrimoine. Nous revenons également sur quelques concepts importants liés à l'ingénierie documentaire, dans l'optique d'une gestion efficace de corpus historiques nécessaires à l'étude. Puis, nous nous intéressons à diverses méthodes et outils de modélisation (génie industriel, approches orientées web, DHRM) afin d'analyser dans quelle mesure ces approches peuvent être appliquées dans le cadre de notre étude. Enfin, nous brosons un paysage des formes de valorisation du patrimoine existantes, notamment basées sur l'utilisation des technologies numériques.

2.1 Propos introductif et première hypothèse

Aujourd'hui, en France comme à l'étranger, et grâce au développement des technologies numériques et à leurs innombrables utilisations, la valorisation du patrimoine devient un secteur de l'économie à part entière ([Benhamou et Thesmar, 2011](#)). Cette question n'est plus seulement considérée comme un devoir mais comme un besoin et un atout à la fois économique et pédagogique.

Ainsi, il convient de mettre en place des directives méthodologiques pour une conservation et une valorisation scientifique et pérenne de notre patrimoine ([Laroche et al., 2008](#)).

La mise en œuvre des outils du génie industriel au profit de l'histoire des techniques et du patrimoine a déjà fait l'objet de recherches théoriques. Cette thèse s'inscrit dans la poursuite de ces travaux et vise à étudier et mettre en œuvre un cadre opérationnel pour le *Digital Heritage Reference Model* ([Laroche, 2007](#)) en contexte muséal.

La démarche proposée consiste donc à appliquer la méthodologie proposée dans ([Laroche, 2007](#)) autour d'un objet patrimonial et de formaliser les problématiques soulevées par l'interdisciplinarité SPI¹/SHS².

Le présent chapitre vise à poser le contexte bibliographique des différents champs scientifiques concernés par la méthodologie envisagée. En effet, la spécificité des objets manipulés implique une couverture

¹SPI : Sciences pour l'ingénieur

²SHS : Sciences humaines et sociales

large de la littérature existante pour identifier les outils et méthodes potentiellement exploitables dans le cadre de ces travaux.

Le champ d'application évoqué ici est celui de la muséologie. Il faut d'ailleurs bien distinguer muséologie de muséographie, en ce que la disposition des objets des collections d'un musée n'est pas le seul élément à prendre en compte pour la compréhension et la valorisation de notre patrimoine. Le terme de muséologie a ainsi fait l'objet de nombreuses définitions, l'objet d'étude étant différents selon les musées et les profils de « muséologues ». Certaines acceptions du terme de muséologie portent par exemple sur le caractère institutionnel ou fonctionnel du musée, cependant, nous choisissons ici d'utiliser une définition théorique qui ne soit pas uniquement rattachée à l'institution muséale. En s'appuyant sur les définitions proposées par (Rivière, 1989; Desvallées et Mairesse, 2005) notamment, nous choisissons ici de définir la muséologie comme :

Discipline scientifique visant à étudier la relation spécifique entre l'homme et la réalité, lui permettant de s'appropriier le passé pour le transmettre aux générations futures.

Le musée devient alors effectivement un lieu privilégié pour comprendre et s'appropriier le patrimoine culturel.

Depuis des années, la question de la protection du patrimoine est un enjeu socio-culturel majeur. L'UNESCO³ œuvre depuis 1945 en ce sens avec notamment la signature de la convention pour la protection du patrimoine mondial, culturel et naturel en 1972. Ce texte est régulièrement révisé et l'UNESCO a mis en place les grandes orientations visant à mettre en œuvre les principes de cette convention (UNESCO, 2011; Cotte, 2012).

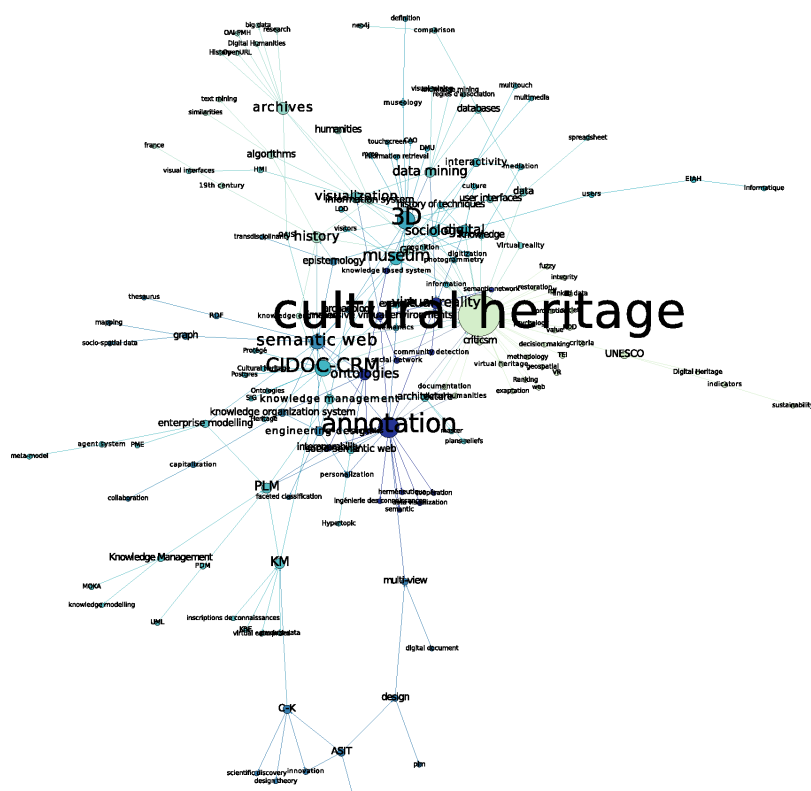


Figure 2.1 – Cartographie des domaines couverts par l'état de l'art. Les liens représentent l'articulation des différents mots-clés pour chaque référence bibliographique. La taille des nœuds est proportionnelle au nombre d'ouvrages concernés.

Une première hypothèse que nous pouvons faire ici est la suivante :

³United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization

La valorisation d'un objet patrimonial peut servir de support à l'élaboration d'une méthodologie de gestion de connaissances pour la muséologie.

Ce postulat dresse le profil de ce que sera l'approche employée pour répondre à la problématique industrielle. Nous tenterons donc de valider cette hypothèse dans la suite de ce manuscrit, d'une part en définissant le cadre de cette méthodologie et d'autre part en démontrant l'intérêt d'une telle méthodologie pour la problématique industrielle qui est d'améliorer la valorisation des objets patrimoniaux et la conception des moyens de médiation.

La particularité des objets patrimoniaux réside notamment dans leur unicité. Chaque objet est en effet différent de part les usages qui en ont été faits et de l'ensemble du vécu de l'objet. Ainsi, deux objets ne peuvent que très rarement être modélisés d'une façon parfaitement similaire, ce qui distingue les modèles à imaginer pour le patrimoine des modèles produits utilisés dans les entreprises contemporaines. Cette diversité des objets impose donc une approche suffisamment souple et particulièrement centrée sur l'humaine pour la constitution d'un méta-modèle pour le patrimoine. Nous verrons au chapitre 3 comment il est possible de se rapprocher d'une modélisation adaptée pour la gestion des connaissances historiques. La différence entre la culture et l'industrie réside en partie dans cette distinction.

Pour la suite de ce chapitre, nous faisons le choix de structurer l'analyse des approches et outils existants comme suit :

1. L'étude des documents historiques sur lesquels toute analyse patrimoniale se base. Ces documents, qui sont des sources permettant aux historiens de créer de nouvelles connaissances, doivent être pris en compte à la fois en tant que matériau d'étude mais également en tant que moyen de valorisation et de compréhension du patrimoine. C'est pourquoi nous nous intéresserons à l'ingénierie documentaire et aux méthodes de capitalisation des connaissances ;
2. Puis, nous étudions les systèmes permettant de modéliser et de supporter ces connaissances historiques pour différents objectifs et différents métiers (historiens, conservateurs, témoins, visiteurs de musée, etc.). Nous nous sommes intéressés aussi bien aux approches théoriques qu'aux outils et méthodologies utilisés dans le domaine de l'histoire et de la muséologie pour la conservation et la valorisation du patrimoine.
3. Enfin, nous présentons un panorama des techniques et approches dédiées aux différentes formes de valorisation du patrimoine et des connaissances historiques en général. Ce panorama illustrera aussi bien des exemples issus de la recherche académique que du monde professionnel des musées. Un point sera fait notamment sur la question du numérique et de ses enjeux dans le domaine qui nous intéresse ici.

Pour construire ce chapitre de manière cohérente étant donné la diversité des champs disciplinaires concernés, nous avons choisi de commencer par la description de différents documents faisant référence à l'international dans le domaine du patrimoine :

- l'UNESCO : Organisation des Nations Unies pour l'Education, la Science et la Culture (en anglais *United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization*) pose avec la convention du patrimoine le cadre réglementaire le plus complet, notamment pour l'inscription de biens sur la liste du patrimoine mondial de l'humanité.
- l'ICOMOS : Conseil International des Monuments et des Sites (en anglais *International Council on Monuments and Sites*) est une ONG de plus de 8000 professionnels créée en 1965 suite à la charte de Venise, et travaille à la promotion d'une démarche scientifique pour la conservation et la valorisation des monuments et des sites ;
- les groupes de recherche travaillant dans le domaine de la visualisation assistée par ordinateur pour l'archéologie comme l'EPOCH (*European Network of Excellence in Open Cultural Heritage*) qui propose en 2005 un ensemble de bonnes pratiques sous la forme d'une charte (Charte de Londres),

ou la SEAV (*Spanish Society of Virtual Archaeology*) qui propose une spécialisation de la charte de Londres sous la forme des “Principes de Séville”.

Nous verrons quelles sont les critères à prendre en compte et quelles sont les limites de ces documents dans le cadre de notre travail. L'état de l'art se penchera donc sur l'analyse des possibilités méthodologiques pour couvrir le processus de patrimonialisation sur les trois points que sont :

- l'identification d'un objet patrimonial ;
- la conservation et la gestion de ces objets et des connaissances qui leurs sont liés ;
- l'accès aux informations et la valorisation de ces objets ;

Ce préambule permettra de positionner le contexte scientifique du travail et de justifier le découpage de l'état de l'art. En effet, l'analyse de ces références internationales permettra de situer les manques méthodologiques et d'identifier les contraintes ainsi que les bonnes pratiques quant au processus de patrimonialisation.

2.2 Critères d'évaluation et bonnes pratiques pour la conservation et la valorisation du patrimoine

Les différentes communautés scientifiques travaillant pour la conservation et la valorisation du patrimoine ont établi des principes de « bonne conduite » pour garantir des méthodes de recherche scientifiques adaptées. Une analyse croisée de ces principes nous permettra de définir des critères de validation de notre approche, tant concernant le processus de capitalisation des connaissances que concernant les interfaces de visualisation et de valorisation proposées.

Nous nous intéressons ici au point de vue de 4 communautés sur cette question de la conservation et de la valorisation du patrimoine culturel que sont :

- l'UNESCO et l'ICOMOS⁴ en tant qu'institutions de référence pour le classement et la sauvegarde du patrimoine mondial ;
- la charte de Londres, constituée par le réseau EPOCH⁵ et dédiée à la question de l'utilisation des technologies de l'information et de la communication pour le patrimoine culturel, ainsi que la charte de Séville, une extension de la charte de Londres pour la communauté des chercheurs en archéologie virtuelle.

2.2.1 Convention du patrimoine de l'UNESCO

La grille de lecture pour l'analyse et l'évaluation du patrimoine la plus ancienne est certainement celle établie par l'UNESCO. L'UNESCO propose un ensemble de critères pour évaluer la valeur universelle exceptionnelle d'un bien patrimonial, condition nécessaire pour être classé au patrimoine mondial (UNESCO, 2011).

Deux conditions régissent la capacité d'un bien à satisfaire ces critères : l'authenticité et l'intégrité. La condition d'authenticité s'exprime à travers plusieurs attributs :

- forme et conception
- matériaux et substance
- usage et fonction
- traditions, techniques et systèmes de gestion

⁴ICOMOS (International Council on Monuments and Sites) est une ONG créée en 1965 dont le but est de se consacrer à la protection et la conservation des monuments, ensembles et sites du patrimoine culturel

⁵EPOCH - European Network of Excellence for Open Cultural Heritage est un réseau d'experts formé pour travailler sur l'amélioration de l'efficacité des technologies de l'information et de la communication en lien avec le patrimoine culturel.

- situation et cadre
- langue et autres formes de patrimoine immatériel
- esprit et impression
- autres facteurs internes et externes

Toutes les sources d'informations (orales, écrites, figuratives et physiques) sont nécessaires pour estimer la nature, les spécificités la signification et l'histoire du patrimoine culturel. Une déclaration d'authenticité doit évaluer le degré d'authenticité de chacun de ces critères.

La condition d'intégrité s'évalue au travers de plusieurs critères et forme une appréciation globale du caractère intact du bien patrimonial :

- le bien possède tous les éléments permettant d'exprimer sa valeur exceptionnelle universelle
- le bien est d'une taille suffisante pour permettre une représentation complète des caractéristiques ou processus qui transmettent l'importance de ce bien
- le bien subit des effets négatifs liés au développement et/ou au manque d'entretien.

La difficulté de l'utilisation de cette grille de lecture est soulignée par ([Cotte, 2012](#), p.172) : il est particulièrement complexe d'identifier les caractéristiques d'une œuvre répondant aux critères de cette convention, et de faire ressortir de manière compréhensible les relations entre l'œuvre et la science, la technique ou les savoir-faire. L'auteur mentionne donc la nécessité d'une analyse sur le temps long de chaque portion de l'histoire imbriquée dans le cycle de vie de l'œuvre considérée.

2.2.2 Charte de Londres

Depuis l'utilisation massive des technologies numériques pour la conservation et l'interaction avec le patrimoine culturel, la question de la pertinence de l'utilisation systématique de ces outils a été soulevée. C'est ainsi que la "London charter" a été proposée puis entérinée par EPOCH pour une diffusion large au sein de la communauté concernée ([EPOCH, 2009](#)).

La charte de Londres énonce 6 principes pour la visualisation assistée par ordinateur dédiée à la recherche et la valorisation du patrimoine culturel :

- *Implementation*. La charte doit être évolutive au gré des contributions des communautés travaillant dans le domaine de la visualisation du patrimoine.
- *Aims and methods*. Une solution basée sur la visualisation assistée par ordinateur ne doit être envisagée que lorsque celle-ci est la méthode disponible la plus appropriée. Le choix de la solution doit se baser sur une évaluation systématique des solutions existantes
- *Research Sources*. Une approche basée sur la visualisation assistée par ordinateur doit reposer sur un processus de documentation scientifique basé sur des sources historiques identifiées comme étant pertinentes et analysées.
- *Documentation*. La méthodologie doit être suffisamment documentée afin d'être comprise et évaluée.
- *Sustainability*. Les stratégies employées doivent permettre la pérennité des résultats et de la méthodologie et donc se baser sur les données et connaissances plutôt que sur le médium de visualisation.
- *Access*. La création et la mise à disposition des moyens de visualisation doit mettre en évidence la valeur ajoutée de ces moyens pour l'accès aux connaissances relatives au patrimoine culturel.

2.2.3 Charte de Séville

La Charte de Séville étend les principes de la charte de Londres pour le domaine de l'archéologie virtuelle. Les objectifs sont multiples mais se focalisent sur une pédagogie active pour sensibiliser les chercheurs

mais également le public aux nouveaux enjeux que permettent les avancées technologiques pour le champ de l'archéologie. (Collectif, 2013)

- *Interdisciplinarity.* L'interdisciplinarité est essentielle pour un projet relatif au patrimoine et nécessitant l'utilisation de technologies de pointe. Une équipe interdisciplinaire ne doit pas se limiter au travail en parallèle de plusieurs spécialistes mais doit soulever des discussions et débats communs.
- *Purpose.* Les objectifs d'une approche de visualisation assistée par ordinateur doivent nécessairement reposer sur la recherche, la conservation et/ou la dissémination des connaissances relatives au patrimoine archéologique. Les traces archéologiques ne doivent pas être un prétexte à l'application de technologies de visualisation.
- *Complementarity.* Une approche basée sur des outils de visualisation assistée par ordinateur ne doit pas être considérée comme une alternative mais plutôt en complément des approches historiques traditionnelles, par exemple lorsque les matériaux archéologiques ont été détruits.
- *Authenticity.* L'authenticité d'une reproduction virtuelle du patrimoine doit permettre de distinguer clairement les différentes hypothèses de recherche et doit signaler les éléments de pure fiction. Enfin les outils de visualisation doivent aider les spécialistes à gérer les traces archéologiques (en terme de suivi).
- *Historical rigour.* Tout travail de visualisation assistée par ordinateur doit reposer sur un travail de recherche scientifique solide et documenté afin d'approcher le niveau maximum de véracité.
- *Efficiency.* Le critère d'efficacité doit prendre en compte dès le début du projet la durabilité technique et économique de l'installation. La préférence doit donc aller aux investissements sur le long terme, prenant en compte les coûts de maintenance ultérieurs.
- *Scientific transparency.* Les outils de visualisation doivent être documentés et pouvoir être testés par la communauté de chercheurs ou professionnels. La valorisation des travaux doit être disséminée le plus largement possible auprès des différentes communautés scientifiques.
- *Training and evaluation.* Des sessions de formation doivent être prévues pour l'appropriation des outils par les scientifiques et le public. De même, la qualité finale des outils proposés doit faire l'objet d'une évaluation auprès d'un nombre représentatif d'utilisateurs finaux, experts ou non.

2.2.4 Principles for the recording of monuments, groups of buildings and sites, ICOMOS

Les principes suivants (ICOMOS, 1996) ont été ratifiés en 1996 lors de la 11^e assemblée générale de l'ICOMOS. Ils décrivent l'intérêt de l'enregistrement du patrimoine culturel, les responsabilités qui en découlent et les considérations à prendre en compte pour y parvenir.

L'enregistrement est essentiel pour :

1. acquérir la connaissance nécessaire à la compréhension du patrimoine culturel et la reconnaissance de sa valeur, promouvoir l'intérêt de la société vis-à-vis du patrimoine par la diffusion des informations et assurer une maîtrise des travaux de conservation qui doivent être adaptés à la spécificité du patrimoine ;
2. permettre un niveau de détail suffisant des informations pour maintenir une trace des objets patrimoniaux voués à la disparition, informer les décideurs locaux, sensibiliser aux efforts de conservation à mettre en œuvre et enfin promouvoir le patrimoine auprès du public ;
3. assister le travail de recherche et prévenir les éventuels accidents pouvant endommager le patrimoine culturel.

La méthodologie pour l'enregistrement doit reposer sur les deux principes suivants :

1. les sources d'information existantes doivent au préalable être analysées afin de statuer sur leur adéquation avec le nouvel enregistrement. Cette recherche doit se faire aussi bien auprès des institutions publiques ou privées qu'auprès des particuliers ;
2. une fois l'analyse précédente effectuée, les méthodes d'enregistrement doivent être adaptés à la nature de l'œuvre patrimoniale. Elles doivent être non-intrusives quand cela est possible, clairement définies dans leur objectif et leur approche et produire des matériaux documentaires pérennes.

En termes de *contenus*, un nouvel enregistrement doit mentionner un certain nombre d'informations essentielles :

- des métadonnées permettant d'identifier l'œuvre, comme le nom, un identifiant unique, la date d'enregistrement, des liens vers les sources utilisées pour la documentation ;
- une localisation la plus précise possible du monument, ensemble ou site (photographies aériennes, plans, triangulation, adresse postale selon le contexte)
- des informations sur l'œuvre en elle-même, son contexte et son environnement : forme et dimension, caractéristiques internes et externes, valeur culturelle artistique et historique de l'œuvre, savoirs et savoirs-faire associés, date d'origine, impact de l'humanité ou de forces naturelles, état d'intégrité, etc.

La *valorisation* et la conservation des enregistrements doit être minutieusement organisée. Les traces doivent être préservées de manière sûre et pérenne. Les documents composant l'enregistrement doivent être accessibles aux autorités compétentes, aux professionnels ainsi qu'au public, au moyen quand cela est possible des technologies de l'information adéquates.

2.2.5 Conclusion

Le tableau 2.1 est une proposition d'analyse croisée des quatre documents de référence mentionnés dans cette section.

Table 2.1 – Analyse croisée des critères d'évaluation du patrimoine et des bonnes pratiques de conservation et de valorisation.

	Critères de classification	Préconisations pour l'analyse scientifique	Préconisations méthodologiques	Conseils de mise en œuvre	Aide aux choix de technologies
UNESCO	✓	×	×	×	×
ICOMOS	×	✓	~	×	×
Charte de Londres	×	~	✓	~	×
Principes de Séville	×	~	✓	~	×

La méthodologie proposée devra donc satisfaire aux conditions énoncées et proposer des conseils de mise en œuvre pour organiser les connaissances nécessaires à l'analyse du patrimoine culturel et son classement. Le bon respect de ces critères par les interfaces de visualisation réalisées pour démontrer l'utilité et l'efficacité de la méthode permettra de valider en partie la méthodologie proposée.

2.3 Sources

2.3.1 L'ingénierie documentaire

La gestion de ces ressources est donc un processus important pour la phase de patrimonialisation d'un objet. L'idéal à atteindre étant bien sûr que cette phase puisse être intégrée au cycle de vie de l'objet et donc que les informations soient capitalisées dès sa phase de conception pour garantir un volume de connaissances le plus exhaustif possible sur la genèse, l'utilisation et le contexte global de l'objet étudié.

L'ingénierie documentaire étudie justement la question de la gestion des documents dans tout projet quel qu'il soit et comment le système documentaire doit s'associer au système technique étudié et au système humain. En pratique, cette discipline vise à améliorer les conditions de conservation et d'utilisation des documents (Keraron, 2007).

Si l'archivage numérique fait l'objet d'un enjeu industriel fort, au travers de normes internationales (ISO 15489 pour la gestion des archives ou *Open Archival Information System* (OAIS) — ISO 14721 (Consultative Committee for Space Data Systems, 2012)), c'est avant tout le résultat du développement fulgurant des documents au format natif numérique et à la numérisation des archives papier.

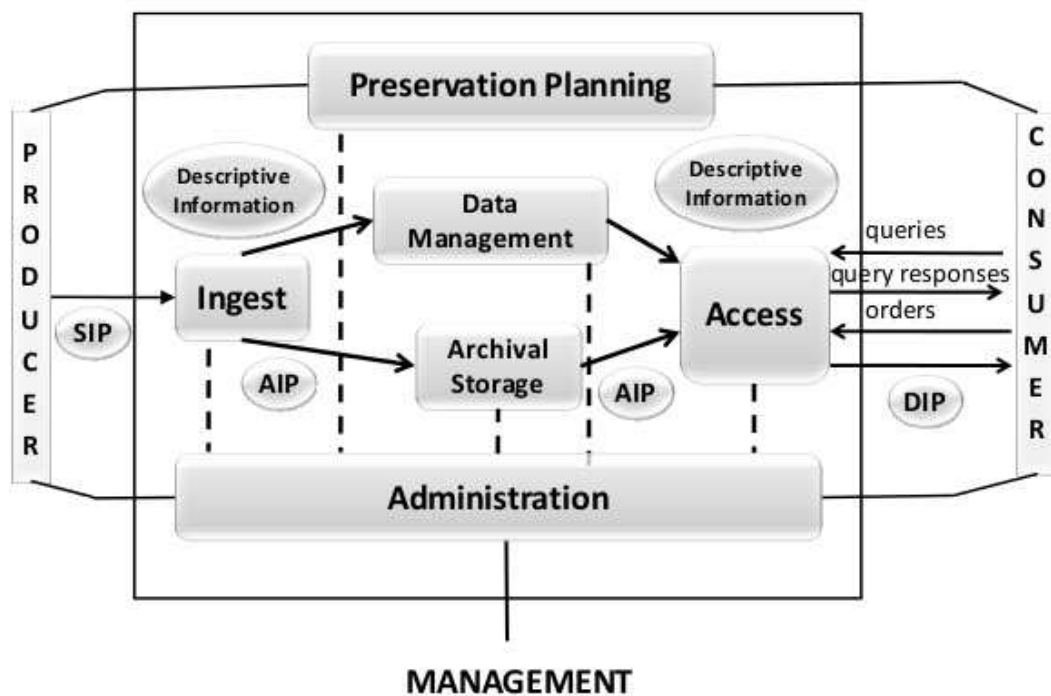


Figure 2.2 – Schéma fonctionnel illustrant le modèle OAIS (Consultative Committee for Space Data Systems, 2012)

La question de l'archivage numérique est essentielle pour des systèmes industriels critiques et à longue durée de vie tels que les centrales nucléaires. Mais c'est également le quotidien des bibliothèques, archives publiques ou privées et des musées, dont la mission est justement de garantir la conservation et l'accès à leurs fonds documentaires.

Par ailleurs, outre le problème de la conservation, se pose, on l'a vu, celui de la mise à disposition des documents et donc des informations auprès des utilisateurs.

Le modèle OAIS (figure 2.2) décrit les problématiques à prendre en compte pour la mise en place d'un système d'archivage et les composants du point de vue organisationnel. Il met notamment l'accent sur l'importance des informations d'interprétation qui doivent permettre de représenter l'information à l'utilisateur (figure 2.3) (Allinson, 2006). Cependant il ne propose pas de méthodologie concrète pour la réalisation d'un tel système.

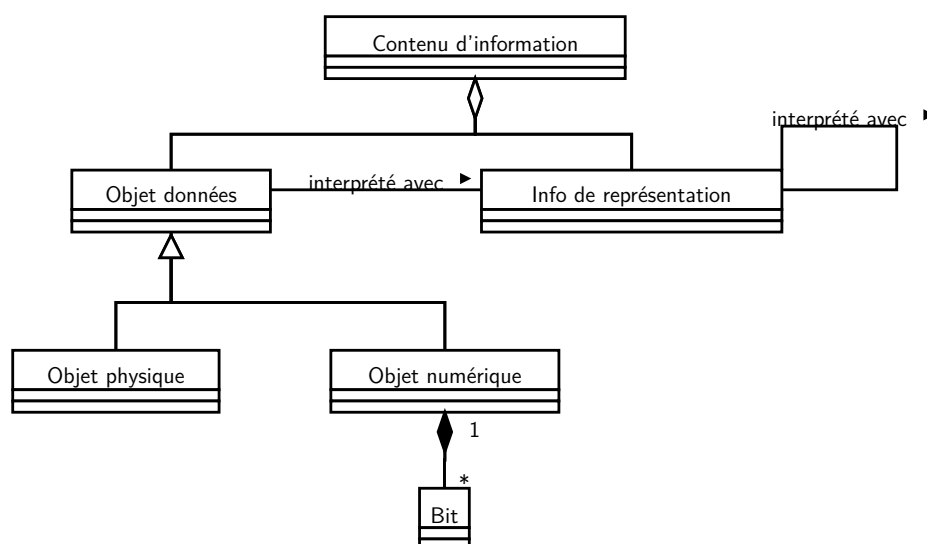


Figure 2.3 – Schéma UML définissant le concept d'objet-information dans le modèle OAIS ([Consultative Committee for Space Data Systems, 2012](#))

BACHIMONT signale également dans ([Bachimont, 2004b](#)) l'importance de la mise en forme des ressources autant que leur fonds. Ces deux types d'informations (contenu et manipulation du contenu) doivent donc être intégrés au système de gestion documentaire.

BACHIMONT ET CROZAT précisent l'importance d'une possibilité de manipulation des documents avant leur diffusion ([Bachimont et Crozat, 2004](#)). Les auteurs proposent de structurer le document en 3 niveaux ([Crozat et Bachimont, 2004](#)) :

- Une structure d'organisation ;
- Une structure de contrôle ;
- Une structure d'interaction ;

Les contenus, ou ressources, n'étant consultables que sous une forme choisie, l'exploitation documentaire repose sur ces 3 niveaux. La structure d'organisation régit la forme du document soumis au lecteur, la structure de contrôle, définie par le dispositif matériel de consultation, induit les modalités de lecture du document et enfin la structure d'interaction permet au lecteur de s'appropriier le contenu (au moyen d'annotations par exemple). Cette distinction souligne l'importance du numérique pour la gestion documentaire comme support d'interprétation des informations que la ressource contient.

L'ingénierie des connaissances⁶ permet donc de dégager des pistes de réflexion à la fois sur la définition de la connaissance, mais également sur les méthodes et outils pouvant supporter cette connaissance.

2.3.2 Les sources en histoire

Dans l'activité d'écriture de l'histoire, une phase de collecte des données (archivistiques notamment) permet de constituer le corpus de documents, nécessaire pour une analyse scientifique et critique de l'objet d'étude. Certains travaux en histoire des techniques mettent en lumière l'intérêt d'une méthode de synthèse et de capitalisation des connaissances pour optimiser cette analyse ([Cotte, 2010](#)).

Sylvain Laubé insiste d'ailleurs dans ([Laubé, 2009](#)) sur la nécessité de trois conditions pour la gestion des documents numériques en histoire des techniques notamment :

- L'explicitation de la méthode de modélisation
- La publication des sources

⁶au sens défini par BACHIMONT dans [Bachimont \(2004a\)](#) comme discipline visant à « concevoir des instruments et outils de la connaissance s'intégrant au travail intellectuel, qu'il soit individuel ou collectif, cognitif ou social »

- La critique des sources pour le chercheur

Dans le contexte de l'étude, la source principale (dans le sens de point de départ) est un objet de collection du musée. On peut alors se demander comment un objet muséographique peut servir de support à la création du récit historique ? Nous verrons dans la suite de l'analyse de l'existant les méthodes et outils qui vont permettre de répondre à cette problématique.

Typologie des sources

Les données manipulées par les historiens sont hétérogènes, aussi variées que la nature des objets patrimoniaux : artefacts techniques, culturels.

Ainsi, les sources primaires et secondaires formant le corpus de travail de l'historien en font un ensemble extrêmement diversifié et donc complexe à modéliser par rapport aux objets contemporains d'entreprise.

LAROCHE propose de classer les sources liées à l'archéologie industrielle⁷ selon 3 catégories :

- documents de proximité, c'est-à-dire les connaissances internalistes (plans, manuels techniques, etc.)
- documents généraux et techniques, régissant le contexte de la technique (normes, brevets, manuels métiers, objets similaires)
- contexte de proximité, c'est-à-dire les connaissances externalistes (environnement naturel et structurel)

Il existe également des classements plus fins des documents à manipuler ([Rolland-Villemot, 2001](#)).

La diversité de cette typologie de documents soulève des problématiques difficiles à résoudre : comment structurer et organiser ces documents et comment y donner accès. Cette problématique est la même que celle rencontrée par les acteurs du monde industriel et pourrait donc être comparée avec la gestion de documents numériques en entreprise ([Keraron, 2007](#)).

Les œuvres du patrimoine industriel peuvent être considérées comme des objets techniques ayant une structure, une fonction et un comportement, et pourraient donc être modélisées comme un ensemble de 3 sous-systèmes distincts (systèmes technique, documentaire et humain), à l'instar d'un système industriel comme le propose KERARON. Cependant, la démarche de structuration des documents numériques pour la gestion du cycle de vie est différente dans le cas d'une patrimonialisation. D'une part, l'axe des temps est inversé car il s'agit de comprendre l'objet de manière contextualisée et non plus d'anticiper des besoins pour un cycle de vie à venir ou en cours, et d'autre part, le processus de patrimonialisation fait intervenir des connaissances externes au cycle de vie de l'objet. Chaque artefact ancien est lui-même la combinaison de plusieurs systèmes autour desquels il convient de cristalliser les connaissances disponibles afin de les resituer pour les restituer. En effet, il s'agit pour nous d'établir une rétrospective de la vie de l'objet ce qui nécessite une analyse d'un certain nombre de cycles de vie imbriqués, liés aux systèmes composant l'environnement de l'objet. Il peut alors s'agir d'autres objets techniques ayant une temporalité similaire et intervenant dans la vie de l'objet d'étude ou bien de systèmes socio-économique ayant des temporalités différentes mais qu'il est nécessaire de prendre en compte.

Gestion des sources historiques

De nombreuses normes régissent ainsi le fonctionnement des systèmes d'information des musées, notamment celles liées aux méta-données servant à l'indexation des contenus.

On distingue les normes de classification des catégories (SPECTRUM ou UNIMarc⁸ pour les musées d'histoire par exemple, le CDWA⁹ pour les musées d'art, ISAD(G) ou encore le Dublin Core pour les ressources en ligne) des normes liées aux choix du vocabulaire (thésaurus ou autres formes de vocabulaire

⁷ Terme proposé par Maurice Daumas ([Daumas, 1978](#)) et désignant l'étude des vestiges du patrimoine industriel

⁸ Voir chapitre 1

⁹ Categories for the Description of Works of Art, ou CDWA propose une liste de plus de 500 catégories pour la classification des œuvres d'art.

contrôlé). En pratique, le choix de la norme découle souvent de celui de la solution logicielle pour le système de gestion des collections. De même, le thésaurus est souvent propre à l'institution car adaptée à la nature de ses collections. Dans le cas du musée d'histoire de Nantes, le thésaurus utilisé pour la description des objets de collection contient une liste de 70 pages de termes à privilégier, classés par catégorie (milieux naturels, artisanat, beaux-arts, etc.).

Il existe ainsi des dizaines de bases de données historiques accessibles en ligne (voir tableau 2.2), soit directement liées au système de gestion des collections des musées, soit provenant d'institutions locales ou nationales basées sur l'inventaire général¹⁰ comme pour le portail Collections¹¹ ou provenant du récolement des collections¹² comme Joconde¹³ par exemple soit encore découlant de projets de recherche spécifiques.

Si ces approches de gestion documentaire doivent être prises en compte pour la mise en place d'une méthodologie efficace, il convient maintenant de s'intéresser à la création des connaissances à partir de ces sources, processus inhérent au travail de l'historien et du fonctionnement du musée. En effet, comme l'illustre la figure 2.4, les connaissances contenues dans les notices qui constituent ces bases de données sont rarement suffisantes pour saisir l'objet ou le système étudié dans son ensemble, sa complexité.



Figure 2.4 – Exemple de la notice d'un pulvérisateur présente dans la base Joconde.

Par ailleurs, les données historiques se caractérisent par leur imperfection. Si l'on cherche parfois à corriger ces imperfections ou à les modéliser pour les gérer dans les système d'information (Runz, 2008), elles restent le plus souvent partie intégrante de la création du récit historique et en constituent toute la richesse et la complexité. Cette imperfection peut-être caractérisée selon 4 points d'après (Bouchon-Meunier, 1995) :

- incomplétude
- imprécision

¹⁰Service créé en 1964 visant à recenser et décrire l'ensemble des constructions présentant un intérêt culturel ou artistique ainsi que l'ensemble des œuvres d'art créés ou conservés en France depuis les origines

¹¹<http://www.culture.fr/Ressources/Moteur-Collections>

¹²Le récolement des collections est une obligation en France pour tous les musées de France comme énoncé dans l'article L.451-1 du Code du Patrimoine

¹³Créé en 1975, Joconde est le catalogue collectif des collections des musées de France, donnant accès à près de 500 000 notices. Source : <http://www.culture.gouv.fr/documentation/joconde/fr/apropos/presentation-joconde.htm>

Table 2.2 – Comparaison non-exhaustive de base de données historiques existantes

Nom	Gestionnaire	Type de données	Technologies	Accès
Mérimée	MCC	Architecture	Web sémantique	Accès web - portail collections
Palissy	MCC	Mobilier	Web sémantique	Accès web - portail collections
Mémoire	MCC	Images, fonds photographiques	Web sémantique	Accès web - portail collections
Thésaurus	MCC	Vocabulaire		Accès web - portail collections
Archidoc	MCC	Bibliographie		Accès web - portail collections
Atlas des patrimoines	MCC	Cartes	SIG	Accès web
Gallica	BNF	Ouvrages	Web sémantique	Accès web
Joconde	MCC	Collections musées	Web sémantique	Accès web
Carte archéologique	DRAC	Dossiers communaux et données archéologiques	SGBD+SIG	Accès sur place
ArchéoGRID	Institut Ausonius (Université Bordeaux 3)	Données archéologiques (documents iconographiques et méta-données pour la description des <i>talatat</i>)	Base de données + générateur de texture pour les modèles 3D	Accès web
Europeana(Doerr et al., 2010)	Commission européenne	Portail d'accès	Web sémantique	Accès web

- ambiguïté
- incertitude

Une approche dédiée à la gestion des connaissances historiques devra donc permettre de traiter de telles informations.

Des sources aux connaissances

Avant de décrire les possibilités de transformation des sources en connaissances et les problématiques qui s'y rapportent, il convient de s'interroger sur la définition de connaissance. En effet, le terme de connaissance trouve de multiples définitions dans la littérature, notamment dans le domaine du génie industriel. En effet, la connaissance dépendant de l'utilisateur et du domaine ([Labrousse, 2004](#)), la définition revêt des différences selon les champs d'application.

Samar Ammar-Khodja propose dans ([Ammar-Khodja, 2007](#)) un état de l'art sur la distinction entre les différents concepts présents dans la littérature. L'auteur propose alors, dans le domaine de la fabrication, de définir la connaissance comme « l'ensemble des savoirs et savoir-faire qu'un individu possède et applique lors de la réalisation d'une tâche dans un domaine donné » Dans le contexte de la muséologie, nous choisissons la définition de la connaissance proposée par ([Labrousse, 2004](#)) et utilisée dans ([Laroche, 2007](#)) :

La connaissance est le résultat d'une interaction entre des informations et un système d'interprétation dans un domaine d'applications donné.

En effet, cette définition plus générique correspond plus au contexte de la formalisation des connaissances relatives à des œuvres du passé. L'historien produit une connaissance dépendante de sa propre expérience (ou domaine d'expertise) et résultant de l'analyse d'informations (ou sources historiques).

Le processus de création des connaissances à partir des données est crucial pour nous, car c'est lui qui permet à un historien la mise en corrélation des différentes sources afin de pouvoir en faire l'étude et le récit.

En effet, le rôle de l'histoire est de « traduire l'ensemble des faits dans un récit cohérent », de les « installer dans un contexte » afin de « redonner sens et intelligibilité au passé. » ([Cotte, 2009](#))

Michel Cotte explique par exemple dans ([Cotte, 2009](#), p.15) que notre mission est de conserver la connaissance d'un processus technique visant à produire un objet ou à effectuer une tâche matérielle. Or ce processus est caractérisé par « l'utilisation rationnelle d'un ou d'une série d'artefacts par l'Homme dans un espace-temps donné au sein d'un système socio-technique ». Non seulement une approche dynamique est donc nécessaire à la compréhension de ces processus techniques et des produits qui s'y rattachent, mais cette approche doit être également être multi-dimensionnelle comme l'a démontré Florent Laroche dans ([Laroche, 2007](#)) pour intégrer le système socio-technique et l'espace-temps liés au cycle de vie de l'objet.

C'est pourquoi nous cherchons à modéliser et intégrer des données hétérogènes relatifs au cycle de vie complexe des objets du patrimoine.

Ce processus de création des connaissances est également préalable au processus de médiation et donc à la transmission des connaissances auprès du public dans le cadre muséal. En effet, il n'y a pas d'écriture du patrimoine pour rendre compte des processus comme le font les historiens. L'objectif est donc d'aller plus loin que le discours muséographique. La complexité de cette tâche vient des temporalités de la vie de l'objet, c'est-à-dire de machines complexes. Une mise en relief ensembliste est nécessaire. ([Cotte, 2009](#))

Jean-Louis Kerouanton propose par exemple d'utiliser l'analyse spatiale pour cette mise en relief ([Kerouanton, 2009](#)). En effet, si les procédés d'analyse spatiale sont trop sophistiqués, les données stockées sont trop lacunaires. Or l'analyse spatiale d'objets techniques passe par l'étude des processus pour comprendre le contexte de l'objet. Il y a donc nécessité d'une représentation graphique systématique des

objets dans leur environnement. Et la simple superposition visuelle de plans de différentes natures est très éclairante.

Le musée pouvant être décrit comme une entreprise en tant qu'ensemble d'activités, de produits et de ressources, nous nous sommes également intéressés à l'apport potentiel des recherches en génie industriel pour assister ce processus de capitalisation et de modélisation.

Le génie industriel propose dans la littérature de nombreuses méthodes de capitalisation des connaissances (voir tableau 2.3) afin de faire passer une connaissance d'implicite à explicite ([Nonaka et Takeuchi, 1995](#); [Nonaka, 1994](#)) et de la mémoriser.

Table 2.3 – Comparaison non-exhaustive de méthodes existantes de capitalisation de connaissances

Nom	Type de connaissance	Description	Méthodologie
MKSM - MASK	Connaissance produit	Maîtriser la complexité dans les projets de gestion de connaissances	Entretiens, Analyse de documents par SADT et réseaux sémantiques
KADS - CommonKADS	Connaissance métier-Entreprise	Méthode de conception d'un système à base de connaissances	Entretiens, Analyse de documents par UML
MOKA	Connaissance métier	Méthode de formalisation des connaissances en vue de développement d'applications KBE, KBS	Entretiens, Analyse de documents par Ontologies ICARE
ArdansMake	Connaissance métier	Formalisation des connaissances avec génération automatique de bases de données, fichiers d'exploitation	Système modulaire Ardans Knowledge Maker avec suite bureautique de gestion et système d'annotations. (Ardans, 2011)
KOD	Connaissance produit	Méthode de développement des systèmes à base de connaissances	Recueillir le maximum de données verbales auprès d'un expert et à les regrouper pour former un modèle UML via des entretiens et l'analyse de documents

Le terme de connaissance implicite désigne des connaissances personnelles difficiles à formaliser tandis que les connaissances explicites sont codifiées transmissibles au moyen d'un support ou médium. Si cette distinction s'applique particulièrement au contexte de l'entreprise, nous pouvons utiliser cette terminologie pour les connaissances historiques. Les connaissances implicites représentent le savoir de l'historien, sa démarche intellectuelle, tandis que les connaissances explicites sont formalisées à travers le processus d'écriture, ou historiographie.

La capitalisation des connaissances est une problématique connue dans le contexte industriel de la gestion du cycle de vie des produits (PLM). Le principe de conception des systèmes à base de connaissances repose sur l'identification, la capture, l'analyse, la structuration et la formalisation des connaissances de

telle sorte que celles-ci puissent être accessibles et ré-exploitées par tous les acteurs concernés ([Bernard et al., 2009](#)).

AMMAR-KHODJA définit d'ailleurs la gestion des connaissances (ou KM — Knowledge Management) comme « un processus systématique, organisé, explicite et continu de création, dissémination, application, renouvellement et mise à jour des connaissances for atteindre des objectifs organisationnels ».

Ces méthodes destinées à un contexte industriel sont peu adaptées à la capitalisation des connaissances en histoire de par les types de données manipulés. L'ontologie ICCAREF de la méthode MOKA permet par exemple de modéliser des éléments de connaissances comme des activités, des contraintes, règles, etc., concepts adaptés au monde manufacturier. Ces concepts peuvent être retrouvés lors d'une analyse historique (d'une entreprise manufacturière par exemple), mais la méthodologie d'acquisition des connaissances liées à ces concepts est inversée. Il faut noter que certaines tentatives ont été menées pour adapter ces méthodes à la modélisation des connaissances historiques ([Ermine et al., 2004](#)). En l'occurrence, une extension aux modèles proposés dans la méthode MASK, le modèle des lignées, a été utilisée pour modéliser l'évolution de l'électronique dans l'automobile. Si la démarche est particulièrement intéressante et enrichissante de notre point de vue, elle reste particulièrement difficile à mettre en place dans un contexte muséal, et adaptée aux objets et concepts techniques.

D'ailleurs, LAROCHE explique que « l'approche historique semble être plus aboutie que les méthodes de capitalisation des connaissances des objets techniques utilisées dans l'industrie » car en histoire, « la démarche consiste à identifier tous les paramètres pouvant expliquer pourquoi la machine se trouvait ici, pourquoi elle se trouve là, pourquoi elle fonctionnait comme ceci puis comme cela » ([Laroche, 2007](#)).

Cependant, l'approche mise en œuvre dans ces méthodes permet de dégager des bonnes pratiques pour une méthodologie de capitalisation des connaissances historiques. Il est donc nécessaire de se réapproprier les méthodes et techniques du génie industriel à la problématique spécifique qu'est celle de l'analyse historique.

C'est de cette façon que nous pourrions ensuite proposer une structure d'interaction adéquate avec les sources historiques, quelles qu'elles soient. En effet, il est essentiel de re-contextualiser un objet pour en saisir le sens ([Bonnot, 2002](#)). D'ailleurs, ROLLAND-VILLEMOT affirme qu'il est « essentiel que l'objet à restaurer soit préalablement étudié et compris sous tous ces aspects, même si par la suite ne seront privilégiés, pour des raisons muséographique ou techniques, que certains aspects » ([Rolland-Villemot, 2001](#)).

LATOUR illustre d'ailleurs très bien l'importance d'une analyse externe de l'objet avec l'exemple d'Aramis ([Latour, 1992](#)) : « Un projet technique isolé est incompréhensible ».

On voit poindre ici l'importance de la mise en place d'un système de gestion des connaissances avec un accès multi-niveaux, basé sur des critères historiques, techniques, sociologiques, etc. En structurant ces connaissances et en les associant aux objets étudiés, il devient alors possible d'effectuer cette mise en contexte de l'objet, de manière virtuelle ou réelle ([Rolland-Villemot, 2001](#)). L'objet de collection deviendrait ainsi une porte d'entrée parmi d'autres vers la connaissance, par le virtuel ou le réel.

COTTE précise d'ailleurs que les outils numériques peuvent aider à cette mise en contexte pour les objets techniques anciens ([Cotte, 2009](#)).

De nombreux autres travaux de recherche portent sur l'intérêt des interfaces de visualisation et de la réalité virtuelle en particulier pour cette mise en contexte ([Roussou, 2002](#); [Champion, 2011](#)), sans toutefois proposer de processus de rétro-action depuis l'interface d'interaction vers le système de gestion des connaissances. C'est dans cette optique que nos travaux s'orientent vers la conception d'un système PLM¹⁴ dédié aux connaissances historiques et à la muséologie.

Dans ce contexte de création de connaissances à partir de sources historiques, nous faisons l'hypothèse suivante :

¹⁴Product Lifecycle Management (PLM) désigne l'activité de gestion des informations tout au long du cycle de vie d'un produit d'entreprise, de sa conception jusqu'à la fin de vie

Hypothèse : La méthodologie de patrimonialisation d'un objet muséographique permettrait d'assister les experts conservateurs et historiens dans le processus de conservation et de création des connaissances.

2.4 Systèmes de modélisation et d'organisation des connaissances

Les problématiques scientifiques et industrielles mettent clairement en évidence le besoin d'un modèle de données. La complexité de ces travaux de recherche vient à la fois de l'inter-disciplinarité SPI/SHS mais également de la multi-disciplinarité intra SPI. En effet, si le paradigme PLM et les travaux autour de la gestion des connaissances en entreprise servent de référence pour notre problématique, il est évident que l'élargissement du spectre bibliographique était nécessaire. Ainsi, de l'intelligence artificielle avec les systèmes experts, jusqu'aux systèmes d'information avec les bases de données, géographiques ou non, en passant par les innombrables problématiques issues de l'ingénierie des connaissances et du web d'aujourd'hui, tous ces champs de recherche s'interfacent autour du présent sujet d'étude et plus précisément autour de la question de l'organisation des connaissances historiques et de l'exploitation de celles-ci.

Les « systèmes d'organisation des connaissances » ont pour objectif de définir des principes de description d'un domaine pour faciliter les opérations de classement et de recherche « d'items » plus ou moins abstraits : documents, personnes, lieux, produits, opinions ou activités (Zacklad et Giboin, 2010). ZACKLAD propose de définir ainsi un système d'organisation de connaissances (SOC) comme :

L'ensemble des formes d'écriture codifiées participant à la description documentaire primaire ou secondaire d'une situation.

Ces SOC peuvent prendre de multiples formes (voir tableau 2.4). Cette diversité permet d'associer des applications documentaires formelles (fruit de l'ingénierie des connaissances et de l'intelligence artificielle) nécessitant un consensus mais également des approches plus heuristiques. Une telle multiplicité cadre parfaitement avec le contexte de la muséologie, associant une diversité nécessaire des points de vue pour la recherche en histoire à des applications plus formelles pour le fonctionnement du musée.

Table 2.4 – Typologie de systèmes d'organisation des connaissances (Zacklad et Giboin, 2010) (d'après (Hodge, 2000))

Listes de termes	Classifications et catégories	Listes de relations
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Fichiers d'autorité ▪ Glossaires ▪ Dictionnaires ▪ Répertoires géographiques 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Vedettes-matière ▪ Schèmes de classification ▪ Taxinomies ▪ Schèmes de catégorisation 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Thésaurus ▪ Réseaux sémantiques ▪ Ontologies

Nous choisissons cette définition de SOC pour correspondre à la problématique du présent travail de recherche. En effet, il s'agit bien pour nous de définir des principes de description du domaine de la muséologie et de l'histoire pour supporter la modélisation des connaissances historiques associées à des items (s'appuyant sur des documents hétérogènes) et l'accès à ces items. Un Système d'organisation des connaissances historiques va donc nous servir de support théorique pour la conception d'un méta-modèle

de gestion des connaissances en muséologie. Attachons nous désormais à identifier les modèles existants pour l'identification des briques élémentaires d'un framework adapté aux spécificités du patrimoine culturel et de la muséologie. Nous nous intéresserons donc dans la suite de cette analyse de l'existant aux modèles de représentation des données spatio-temporelles, aux ontologies formelles et schémas de classification des métadonnées, ainsi qu'aux modèles spécifiques aux données historiques.

2.4.1 Système de gestion de données spatio-temporelles

Étant donné la nature des informations (spatiales et temporelles) manipulées dans le cadre de ce travail, il est important de considérer les modèles conceptuels existants relatifs aux espaces urbains et les SIG dédiés aux données archéologiques. Outre les espaces urbains, la contextualisation d'informations historiques passe par l'analyse spatiale et temporelle multi-niveaux (temps court, moyen et long).

La modélisation des données spatio-temporelles repose le plus souvent sur des modèles du type entité-association ou des modèles orientés objet. Parmi les modèles de référence, on peut citer le modèle MADS. Le modèle MADS, *Modeling Application Data with Spatio-temporal features*, permet de représenter des données urbaines multi-échelles et multi-représentations (Parent *et al.*, 1997, 2006). Ce modèle est particulièrement complexe à mettre en œuvre et utiliser de manière simple pour un contexte muséal, bien qu'il ait fait l'objet de travaux de recherche pour son implémentation dans un système de gestion de base de données (Chamseddine, 2011).

Pour la représentation de données 3D urbaines, certains travaux s'appuient sur le modèle CityGML. C'est le cas pour la maquette de Liège (Billen *et al.*, 2009). CityGML est un modèle basé sur GML mais adapté aux spécificités des objets urbains avec l'utilisation de 5 niveaux de détail (du modèle de terrain jusqu'à la modélisation de l'intérieur des bâtiments) (Kolbe *et al.*, 2005).

Enfin, on peut également citer le modèle HBIM (Historic Building Information Model) (Murphy *et al.*, 2013). HBIM permet d'associer des données architecturales numérisées (nuages de points) avec des photographies permettant d'associer une texture aux éléments architecturaux. Ce modèle s'appuie sur le standard de représentation BIM¹⁵ et sur un framework d'association d'objets paramétriques issus d'une base de données architecturales historiques avec le nuage de points.

D'autres travaux font le choix d'un modèle basé sur l'agrégation de connaissances autour d'un ensemble de modèles 3D (Baldissini *et al.*, 2009). Il s'agit en fait de constituer un SIG 3D conçu autour du modèle 3D d'un site de fouilles archéologiques par exemple, auquel vient s'adjoindre l'ensemble des traces archéologiques découvertes. Cette approche se révèle très courante dans la littérature, notamment dans le domaine de l'archéologie et de l'architecture où la structure et la forme des artefacts sont au cœur de l'analyse historique. En effet, comme préconisé par la charte de Londres et les principes de Séville, l'association de connaissances architecturales au modèle 3D permet de garantir la valeur scientifique du travail de représentation (De Luca *et al.*, 2011). Ainsi, la maquette 3D devient le résultat d'un enrichissement sémantique de données géométriques (De Luca *et al.*, 2005). Cette approche utilise le modèle 3D comme artefact de référence pour l'agrégation des connaissances historiques.

2.4.2 Modèles produit-processus pour le PLM

Le concept Product Lifecycle Management (PLM), visant à améliorer la circulation de l'information dans une entreprise tout au long du cycle de vie des produits, est utile pour la gestion des données produits à destination des différents acteurs impliqués. LE DUIGOU (Le Duigou, 2010) définit par exemple le PLM comme « une stratégie d'entreprise visant la gestion collaborative des activités centrées sur le produit durant l'ensemble de son cycle de vie à travers l'entreprise étendue ».

Le cycle de vie d'un produit manufacturé peut être décomposé en trois phases (Kiritsis *et al.*, 2003) :

¹⁵Le BIM (Building Information Modelling) est un fichier numérique stockant l'ensemble de l'information technique de l'ouvrage architectural

1. Begin of Life (BOL), correspondant au début du cycle de vie et englobant les phases de conception et de fabrication ;
2. Middle of Life (MOL), correspondant à la période d'utilisation du produit et englobant principalement la phase de distribution (du point de vue de l'entreprise) et l'activité de support ;
3. End of Life (EOL), caractérisant la fin de vie du produit (recyclage par exemple) ;

Le PLM vise alors à favoriser l'échange d'information entre les acteurs tout au long du cycle de vie du produit, de la phase BOL à la phase EOL. D'un point de vue conceptuel, le PLM vise à optimiser les connexions entre les connaissances et les objectifs afin de fournir les bonnes informations au bon moment et dans le bon contexte ([Terzi et al., 2010](#)).

Les auteurs de ([Terzi et al., 2010](#)) définissent ainsi trois fondamentaux au concept de PLM :

- Les processus définis comme un ensemble d'activités réparties parmi les acteurs d'une organisation et ayant pour objectif la création de valeur pour l'entreprise ;
- Les méthodologies définies comme des principes s'appliquant à des activités données (comme par exemple les procédures à suivre pour la conception de nouveaux produits et basées sur le retour d'expériences passées) ;
- Les technologies de l'information et de la communication ayant pour objectif de supporter l'activité de PLM et d'apporter des moyens d'accès personnalisés à l'information (ERP¹⁶, DMU¹⁷).

Dans le contexte qui nous intéresse, l'approche PLM est en quelque sorte inversée pour l'analyse ou la rétro-conception d'artefacts anciens. La génétique technique, proposée par COTTE comme méthode d'analyse systématique en histoire des techniques, est un exemple d'approche analogue à l'approche PLM ([Cotte, 2010](#)). La contextualisation des objets patrimoniaux passe ainsi par une prise en compte de l'ensemble du cycle de vie de ces objets, selon les principes de l'archéologie industrielle avancée ([Laroche et al., 2008](#)).

C'est pourquoi nous nous intéressons ici au PLM et aux modèles et approches qui s'y rapportent. Le PLM implique en effet la gestion des connaissances métiers et un accès multi point de vue à l'information.

LE DUIGOU explique dans ([Le Duigou, 2010](#)) que le cycle de vie des objets à gérer est en fait composé de deux cycles de vie, celui de l'objet physique (de sa fabrication à sa fin de vie) et de l'objet virtuel (du concept issu d'un besoin jusqu'à l'anticipation de la fin de vie en passant par sa conception et le choix des spécifications).

L'activité de gestion des informations nécessaires pour le PLM s'appuie sur des modèles de représentation des objets d'entreprise. FBS-PPRE (Function Behaviour Structure – Product Process Resource External effect) ([Labrousse et al., 2004](#)) par exemple propose de structurer les informations liées aux objets d'entreprise (produits, processus, ressources et effets externes) selon trois aspects :

- La fonction de l'objet
- Sa structure
- Son comportement

Le méta-modèle PPO (Product, Process, Organization) ([Roucoules, 2007](#); [Eynard, 2005](#); [Noël et Roucoules, 2008](#)) propose également un cadre de modélisation selon 3 niveaux (modèle produit, processus, et organisation) pour l'aide à la décision en conception.

2.4.3 Ontologies formelles et web sémantique

Nous nous intéressons maintenant aux modèles formels et aux outils provenant du développement d'internet, à savoir les ontologies formelles (au sens informatique du terme) et le web sémantique. Nous

¹⁶Les ERP (Enterprise Resource Planning), ou progiciels de gestion intégrés permettent la gestion des transactions au sein de l'entreprise.

¹⁷La DMU (Digital Mock-Up), ou Maquette numérique permettant la visualisation et la simulation virtuelle.



Figure 2.5 – Le système PLM, d'après (Le Duigou, 2010)

proposons ici une introduction à cette approche de manière théorique, puis nous présenterons dans la section 2.4.5 des exemples de ces modèles dédiés au domaine du patrimoine historique.

Le web sémantique, expression inventée par Tim Berners-Lee, désigne l'ensemble des technologies visant à faciliter la structuration et l'échange d'informations sur internet de manière désambiguïsée. Le web sémantique est défini comme « new form of Web content that is meaningful to computers » (Berners-Lee, 2001).

L'objectif de ce mouvement est de permettre aux machines de lire les contenus présents sur internet comme le font les humains et ainsi de faciliter la mise en relation et la recherche d'informations.

Le web sémantique repose sur des protocoles informatiques promus par le W3C¹⁸ selon une architecture bien définie (cf. figure 2.6).

La figure 2.6 montre que cette approche repose essentiellement sur la description du domaine d'étude selon un ensemble de descripteurs formalisés par une ontologie au sens informatique du terme Davies *et al.* (2002); Corby *et al.* (2006); Gandon et Sadeh (2004).

Certains travaux de recherche en sciences pour l'ingénieur mettent en avant ces problématiques dans d'autres secteurs d'activités et proposent des cadres de réflexion intéressants. La littérature fait par exemple état de l'intérêt des ontologies comme approche pour supporter l'activité PLM (Uschold et Gruninger, 1996; Uschold *et al.*, 1998; Matta et Monticolo, 2010; Patil *et al.*, 2005).

Ces modèles de données sont particulièrement utiles pour les activités d'analyse de données et de compréhension des corpus de documents numériques (Dieng *et al.*, 2001). On pourra par exemple mentionner les récents outils développés avec ces technologies du web sémantique et notamment le site web du centre pompidou¹⁹.

¹⁸Le World Wide Web Consortium est un organisme de normalisation dont la mission est de proposer et promouvoir des standards (HTML, RDF, XML entre autres) pour le world wide web

¹⁹<http://www.centrepompidou.fr/>

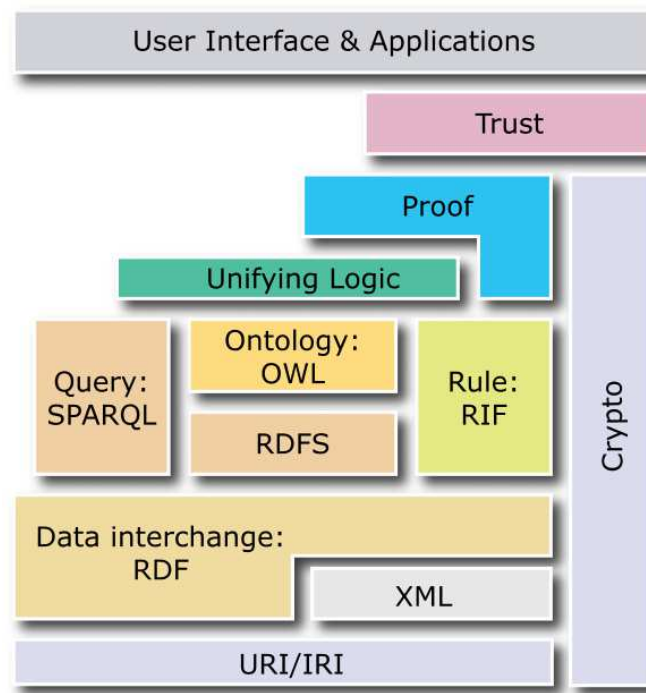


Figure 2.6 – Le cake sémantique. « Semantic Web Stack » par W3C - http://it.wikipedia.org/wiki/File:W3C-Semantic_Web_layerCake.png. Sous licence Public domain via Wikimedia Commons

Parmi les standards régissant la modélisation des métadonnées, on peut citer les suivants :

- FOAF, Friend of a Friend est un vocabulaire RDF permettant de décrire des personnes et les relations entre elles
- Dublin Core (ISO 15836) est un schéma générique pour la représentation de ressources numériques et leurs relations avec d'autres ressources
- SKOS, Simple Knowledge Organization System est un vocabulaire RDF pour représenter des thésaurus
- IPTC Information Interchange Model, un ensemble de métadonnées pour la description de fichiers textes, images et autres médias.

Le web sémantique présente plusieurs limites dans le contexte de notre étude. La principale est la difficulté de mettre en place une approche multi points de vue. Certains travaux de recherche portent cependant sur la mise en place d'un tel web sémantique multi points de vue pour l'entreprise (Bach thanh, 2006) mais sont complexes à mettre en œuvre.

Cette approche permet une modélisation formelle de contenu en vue de traitements informatiques automatisés et leur mise en relation à destination du web. Nous verrons plus loin quelques exemples de l'utilisation de cette approche pour la modélisation et la gestion des connaissances historiques. Cependant, c'est une approche centrée sur le traitement des données par les machines, ce qui n'est pas l'objectif principal de notre étude, mais qui lui est complémentaire. En effet, un des critères principaux de la problématique de la thèse relève de la prise en compte d'utilisateurs humains en priorité et la manipulation des modèles par ces mêmes humains en fonction de leur profil. Nous faisons donc le choix de ne pas baser la définition d'un méta-modèle des connaissances historiques sur la construction d'une ontologie formelle qui découlerait d'un consensus commun entre tous les acteurs.

2.4.4 Web socio-sémantique

Plusieurs chercheurs s'intéressent à l'utilisation de modèles socio-sémantiques pour l'analyse et la représentation d'informations dans un contexte d'accès collectif. C'est le cas notamment des auteurs de (Garlatti

et Prié, 2004) qui proposent une recherche d'information adaptative sur le web basée à la fois sur les métadonnées des ressources mais aussi sur les profils des utilisateurs. ROTH propose dans (Roth, 2013) l'utilisation de frameworks socio-sémantiques basés sur la mise en place de treillis agents-concepts (voir figure 2.7).

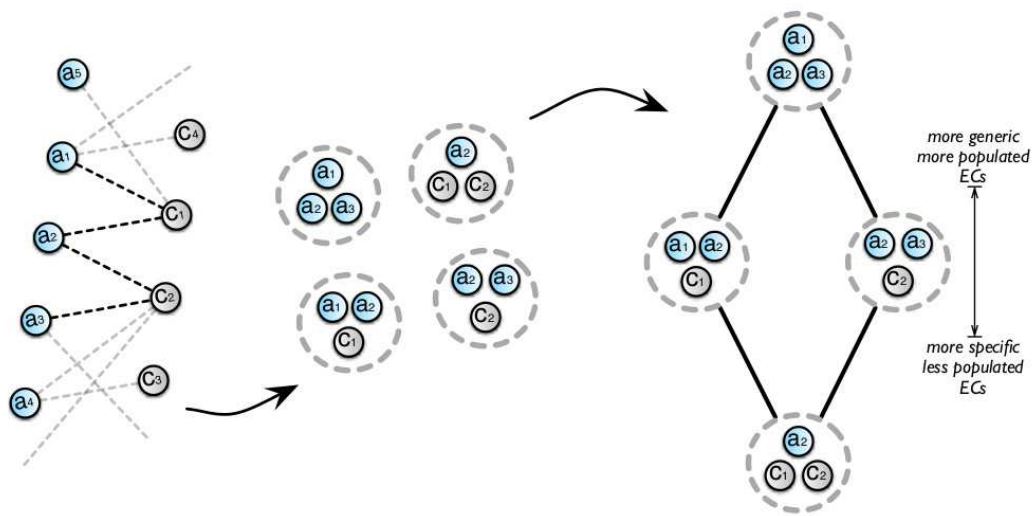


Figure 2.7 – Construction d'un framework socio-sémantique basé sur un treillis agent-concept d'après (Roth, 2013). À partir d'associations entre des concepts et des agents, le treillis est construit de manière hiérarchique au moyen de regroupements successifs.

Cependant, ces modèles sont principalement basés sur l'utilisation de concepts (métadonnées pour le web sémantique) extérieurs à l'utilisateur. Celui-ci doit alors se positionner par rapport à ces concepts pour définir sa recherche. Cette critique est soulevée dans (Szoniecky et Hachour, 2014) dont les auteurs proposent une modélisation sous la forme d'une "monade" définie comme l'association d'une arborescence de documents et d'un réseau de concepts instanciés par des acteurs. L'objectif est de permettre une « multiplicité des rapports entre formes et concepts », donnant ainsi le choix à l'utilisateur de son positionnement par rapport à un ensemble d'informations.

Le web socio-sémantique est une autre piste de recherche, proposé par ZACKLAD comme une approche alternative mais complémentaire à celle du web sémantique. Le web socio-sémantique vise donc à « soutenir les activités de recherche d'utilisateurs humains dans des corpus complexes et évolutifs [...] en inscrivant les pratiques de recherche et d'élaboration informationnelle dans des activités de coopération structurellement ouvertes » (Zacklad, 2005).

L'ingénierie du web socio-sémantique repose sur l'utilisation d'ontologies sémiotiques, en les distinguant des ontologies formelles utilisées dans le web sémantique. La différence provient du fait que les concepts intégrés dans les ontologies sémiotiques sont dépendants de la situation d'usage moyennant un accord de la communauté de pratique sur l'association entre les signes et le contenu sémiotique associé.

Il s'agit ici d'une « approche contextuelle », privilégiant des éléments faisant sens pour l'utilisateur. ZACKLAD note d'ailleurs qu'en ce sens, le contenu et le support ou média de transmission sont dépendants l'un de l'autre. L'appréhension du support de médiation par l'utilisateur est donc un critère important dans la transmission et la compréhension des connaissances.

Cette approche est donc particulièrement adaptée à un contexte pluridisciplinaire, et notamment à la capitalisation des connaissances historiques en ce sens que la construction du savoir doit se faire de manière collaborative et donc supporter une « sémiotique ouverte ».

Un méta-modèle appelé méta-heuristique par ses auteurs et dénommé Hypertopic a ainsi été proposé dans (Zacklad et al., 2007) pour proposer un cadre méthodologique et applicatif du web socio-sémantique.

Cette approche entre particulièrement en résonance avec la problématique de cette thèse. En effet, la dimension sociale et la prise en compte de la diversité des utilisateurs et l'impact de cette diversité sur la

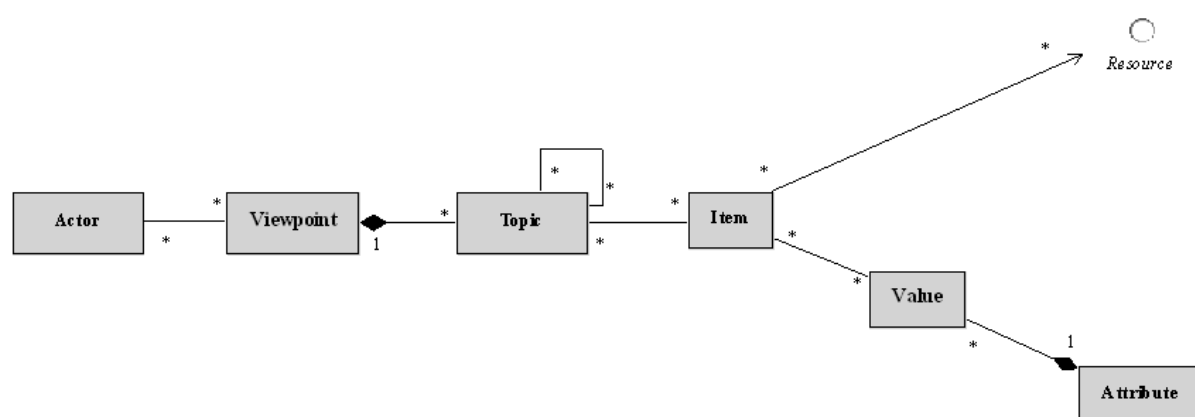


Figure 2.8 – Schéma UML du modèle Hypertopic

classification des données répond à la problématique de l'histoire et du critère d'imprécision des données historiques. Il faut donc permettre aux experts (et notamment aux historiens) de pouvoir qualifier des éléments de connaissances selon différents points de vue, et pouvoir faire évoluer cette modélisation pour reformuler des hypothèses de recherche. Nous nous appuyons donc sur cette approche pour constituer le système d'organisation des connaissances historiques dans le chapitre 3.

2.4.5 Systèmes de gestion existants pour le patrimoine et les connaissances historiques

Modèles ontologiques

La plupart des projets reposent sur l'utilisation combinée ou non de données géographiques issues des fouilles archéologiques par exemple avec des données sémantiques. Ces données sont le plus souvent modélisées au cas par cas, avec les outils et les méthodes propres à chaque équipe de recherche. Certains projets, comme le projet SyMoGIH proposent un modèle plus générique pour modéliser ces données, indépendamment des profils de spécialistes concernés et de la nature des données manipulées (Beretta et Vernus, 2012).

D'autres travaux reposent sur l'utilisation des outils et méthodes du web sémantique. Ces travaux, basés sur les possibilités de modélisation ontologiques, permettent de formaliser un cadre de compréhension et d'interrogation des connaissances relatives au corpus de documents numériques. Cependant, cette approche nécessite un consensus au sein des communautés concernées afin de spécifier l'ensemble des classes et relations constituant l'ontologie du domaine. Sous-jacente à cette problématique de création du récit historique, se pose la question de la mise en perspective critique des sources. En effet, l'étude de sujets historiques implique une analyse rétrospective et subjective, caractéristique inhérente au travail de l'historien. Ainsi, on ne peut approcher de la vérité qu'avec la multiplicité des approches et des points de vue.

Un des cadres de recherche visant à proposer aux chercheurs en sciences humaines des outils performants d'aide à la décision est celui de l'informatique et plus particulièrement les travaux concernant la reconnaissance automatique de textes. Si la plupart des algorithmes visent à effectuer une reconnaissance automatique de signes (notamment pour les langues anciennes), certains auteurs proposent des outils de classification automatique ou de mise en relation de documents (Berzak et al., 2011). Ces nouveaux procédés, issus du développement en science de l'information et en informatique, forment un champ disciplinaire — dénommé actuellement « humanités numériques » ou « digital humanities » — particulièrement adapté aux thématiques des sciences humaines et en particulier à celle de l'histoire. La mise en lumière de relations entre des documents issus d'un corpus de documents historiques va permettre aux chercheurs d'identifier de nouvelles problématiques ou d'aller plus loin dans l'analyse des sources.

Outre la question de l'analyse et de la synthèse des sources historiques, premier socle du dossier patrimonial, il s'agit de s'intéresser à la question du stockage de ces données. Si cette problématique a été soulevée depuis plusieurs dizaines d'années comme étant une priorité dans le cadre de la préservation et de la compréhension du patrimoine, les modèles se sont principalement basés sur une approche purement bibliographique (IFLA, 1998). Cependant, avec l'avènement du web sémantique et les avancées relatives à la problématique de la mise en relation des ressources web (afin de diminuer le bruit et de faciliter les recherches), les bases de données historiques et patrimoniales se tournent de plus en plus vers des modèles basés sur les technologies du web sémantique et notamment le modèle RDF²⁰. Ainsi, les informations sont mises en relation à partir d'un modèle de classes et de prédicats : une ontologie de domaine. Ces ontologies de domaine sont créées par un groupe d'experts du domaine d'études en collaboration avec des cognitivistes et informaticiens.

Aujourd'hui, il existe de nombreuses ontologies dans le domaine des sciences de l'univers, de l'industrie, et également du patrimoine (Pouyllau, 2008, 2012). En histoire des sciences et des techniques, un groupe de recherche SemanticHPST²¹ vise à proposer une ontologie de référence dans le domaine de l'histoire et la philosophie des sciences et des techniques.

Pour le patrimoine, on peut citer notamment le CIDOC-CRM (ISO 21127 :2006) (Crofts *et al.*, 1999; Doerr, 2003), modèle conceptuel de référence créé par le comité international de documentation et basé sur le modèle RDF. De nombreux travaux proposent d'utiliser ce modèle pour modéliser les données historiques (Sinclair *et al.*, 2006; Eide *et al.*, 2008; Isaksen, 2011; Szabados *et al.*, 2012).

D'autres travaux utilisent les technologies du web sémantique en association avec des ontologies de domaine spécifiques à leur contexte d'étude en proposant des interfaces d'accès à l'information sous forme de wikis, mais uniquement à destination des experts (Riechert *et al.*, 2010).

Description du modèle de référence CIDOC-CRM Le modèle de référence CRM propose une ontologie de domaine au sens informatique du terme (Gruber, 1993), et par conséquent un ensemble de concepts dédiés à la modélisation des données du patrimoine culturel, sous la forme d'entités et de liens ou propriétés. 80 entités sont ainsi proposées pour la catégorisation des objets manipulés et 130 propriétés différentes.

La figure 2.9 illustre les principaux types d'entités disponibles dans le modèle pour modéliser les données liées au patrimoine.

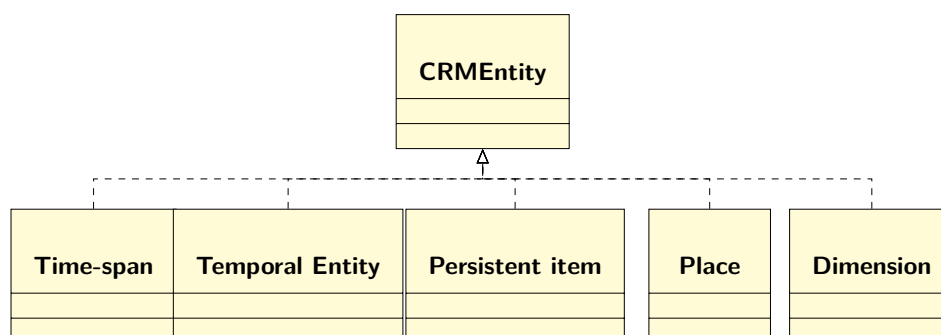


Figure 2.9 – Principales classes proposées dans le modèle de référence du CIDOC (Crofts *et al.*, 1999)

Description du modèle EDM (Europeana Data Model) Europeana²² est un service propulsé par l'Union Européenne qui s'inscrit dans la mouvance du Linked Open Data. Les objectifs d'Europeana sont les suivants :

²⁰Resource Description Framework est un modèle de représentation des données sous forme de triplets pour le traitement automatisé des ressources du web et leurs métadonnées. Ce modèle est développé par le World Wide Web Consortium (W3C)

²¹Semantic Approach To Epistemology And History Of Science And Technology — <http://semhpst.hypotheses.org/>

²²<http://www.europeana.eu/>

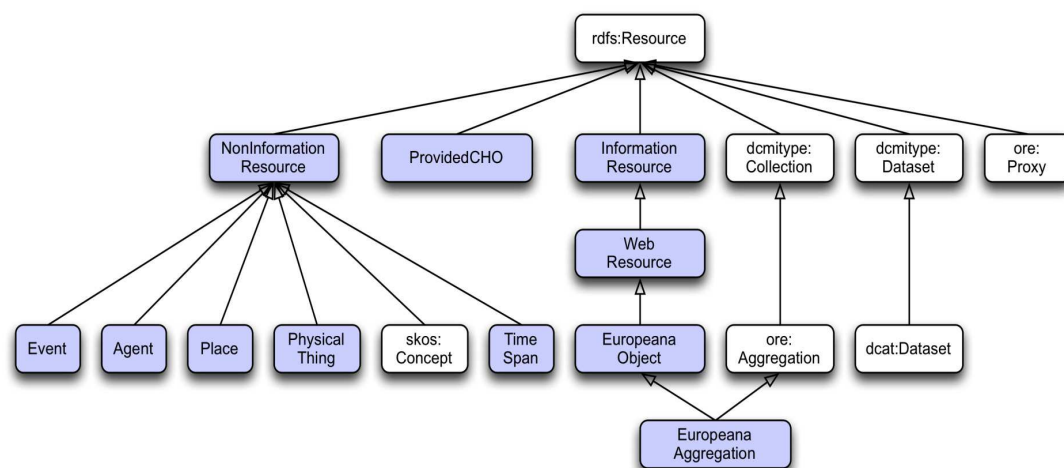


Figure 2.10 – Diagramme de classes du modèle EDM. Les classes en bleu sont celles introduites par EDM tandis que les classes en blanc proviennent de standards existants (European Union, 2014, p.6).

- agréger les données du patrimoine culturel en Europe
- proposer un portail d'accès à ces données
- placer les métadonnées dans le domaine public pour en faciliter l'accès à tous
- proposer des outils pour l'enrichissement des données
- rendre les données disponibles comme Linked Open Data <http://data.europeana.eu/>

Le modèle de données EDM (Europeana Data Model) se base sur différents schémas pour la structuration et la description des données (Doerr *et al.*, 2010) :

- OAI-ORE²³ pour la structuration des métadonnées d'un objet et la possibilité d'avoir de multiples enregistrements pour un même objet
- Dublin Core pour la représentation des métadonnées
- SKOS pour le vocabulaire conceptuel

La figure 2.10 montre la hiérarchie des classes présentes dans le modèle EDM. En plus de ces classes, le modèle propose 38 propriétés (en plus de 40 autres propriétés existantes provenant d'autres standards comme OAI-ORE ou Dublin Core) permettant de caractériser les relations entre les ressources.

EDM permet ainsi de constituer une ontologie de haut niveau pour agréger les ressources culturelles existantes en Europe. Il s'agit d'une approche informatisée pour une mise en réseau et un accès facilité aux ressources existantes.

Conclusion sur l'utilisation d'ontologies formelles L'essor de cette technologie a été tel ces dernières années que certains auteurs ont tenté de faire un état de l'art global de l'utilisation du web sémantique en histoire (Merono-Penuela *et al.*, 2012).

Si ces travaux portent essentiellement sur la modélisation des données à destination du web de données, de récents projets portent sur la modélisation des connaissances des historiens (Nuessli et Kaplan, 2014) ou paradata. D'un point de vue industriel, il s'agit ici d'une approche orientée processus avec une capitalisation des connaissances des experts.

La principale limite de cette approche réside dans la prise en compte de compétences et de sources hétérogènes. Il faut alors mettre en œuvre des ontologies multi-points de vue et gérer l'alignement de différents modèles comme proposé dans (Bach thanh, 2006).

²³Open Archives Initiative Object Reuse and Exchange (OAI-ORE) est un framework pour la description et l'identification de ressources sur le web <http://www.openarchives.org/ore/>

Bien que l'approche du web sémantique mette l'accent sur la modélisation des données à destination du web et du traitement automatisé de gros volumes de données liés entre eux ²⁴, celle-ci souligne l'importance des connaissances thématiques. Les auteurs de (Janowicz, 2009) expliquent par exemple, comme illustré figure 2.11, que la modélisation d'une information historique peut être décrite sous la forme d'un triplet (référence spatiale, référence temporelle, référence sémantique). La référence sémantique permet ainsi de pallier l'incomplétude des données spatio-temporelles, ce qui est souvent le cas pour la recherche en histoire. Cette manière de représenter les informations nous servira de fil conducteur à la fois pour la méthodologie de capitalisation et pour la modélisation des éléments de connaissance en associant des informations sémantiques et physiques aux "items" étudiés.

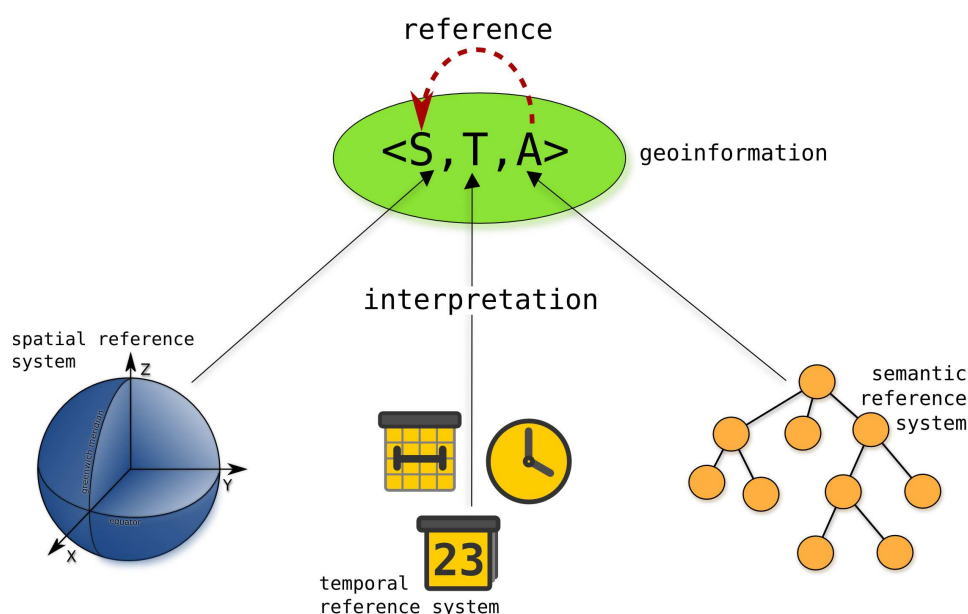


Figure 2.11 – Représentation conceptuelle d'une information historique par (Janowicz, 2009)

La limite principale que nous posons ici concernant l'utilisation d'une approche basée sur la définition d'une ontologie est la difficulté de mise en place d'un consensus. En effet, la définition d'une ontologie ne permet pas pour un utilisateur tiers d'avoir une vision claire sur l'intentionnalité du choix de la sémantique ni sur le processus de création de l'ontologie. Cet « enfermement » sémantique est pour nous un inconvénient majeur de ce type d'approche dans une optique de capitalisation des connaissances historiques. Dès lors, étant donnée l'importance de la considération du créateur et du contexte de création d'une connaissance en histoire, nous faisons l'hypothèse de privilégier une approche anthropocentrée plutôt qu'une approche technocentrée.

Le méta-modèle DHRM : Digital Heritage Reference Model

Dans le cadre de sa thèse intitulée « Contribution à la sauvegarde des Objets techniques anciens par l'Archéologie industrielle avancée. Proposition d'un Modèle d'information de référence muséologique et d'une Méthode inter-disciplinaire pour la Capitalisation des connaissances du Patrimoine », LAROCHE propose une approche conceptuelle et un méta-modèle (décrit par la figure 2.12 permettant de gérer les états et les schèmes relatifs à l'utilisation d'un objet technique ancien.

Le DHRM encapsule donc les états intermédiaires de l'objet technique ancien dans un espace multi-dimensionnel et multi-temporel. Il repose sur deux méta-classes principales que sont les états d'un objet, c'est-à-dire la vue internaliste, et les schèmes, c'est-à-dire la vue externaliste. Les schèmes sont en fait des projections dans le passé d'une partie du contexte d'utilisation de l'objet.

²⁴Cette démarche est appelée Linked Open Data ou LOD

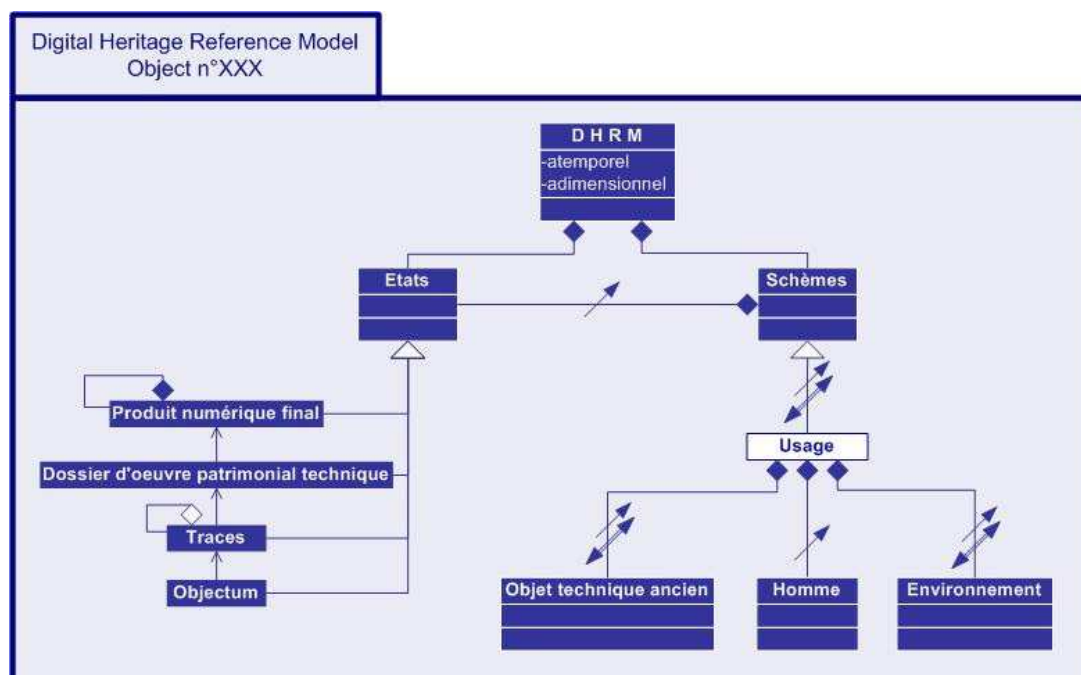


Figure 2.12 – Schéma UML du méta-modèle DHRM proposé par (Laroche, 2007)

Cette approche permet de reconstituer le passé en capitalisant le maximum de connaissances utiles pour la compréhension de l'essence d'un objet. La figure 2.12 illustre la méthodologie formalisée par le DHRM sur le cas d'une machine à laver le sel de l'éco-musée de Batz-sur-mer. Elle représente les différents schèmes permettant de contextualiser et de comprendre le cycle de vie de l'objet technique :

- les usages du sel. On voit ici que le cycle de vie du sel doit être pris en compte dans l'étude du cycle de vie de la machine à laver le sel
- l'entreprise Bertrand, par les informations essentielles qu'elle représente en terme d'implantation géographique, d'organisation, d'éléments implicites ou non-dits (interactions sociales et politiques), etc.
- les composants de la machine à laver. Il s'agit ici de la vue internaliste où chaque composant doit également être pris en compte.
- l'éco-musée de Batz-sur-mer, qui représente une étape du cycle de vie de l'objet en tant que patrimoine industriel.

On voit ici plusieurs cycles de vie se croiser, selon différentes temporalités et différentes dimensions (spatiale, économique, politique, etc.). C'est ce qui fait la richesse et la complexité du processus de patrimonialisation.

Le DHRM constitue donc pour nous le point de départ conceptuel pour une méthodologie opérationnelle de capitalisation et de formalisation des connaissances en contexte muséal. En effet, l'aspect multi-dimensionnel relatif à la prise en compte de l'imbrication de plusieurs cycle de vie est essentiel pour rendre compte de la richesse et de la complexité du patrimoine culturel. Cette agrégation d'informations hétérogènes permettra *a posteriori* de choisir le niveau de granularité et les indicateurs pour l'accès multi-utilisateurs.

À partir des éléments présentés dans cette section, nous proposons l'hypothèse de recherche suivante :

Hypothèse : Le système d'organisation des connaissances historiques permettrait d'optimiser la conception des dispositifs muséographiques grâce à une intégration des données et des processus métiers en amont de la phase de valorisation.

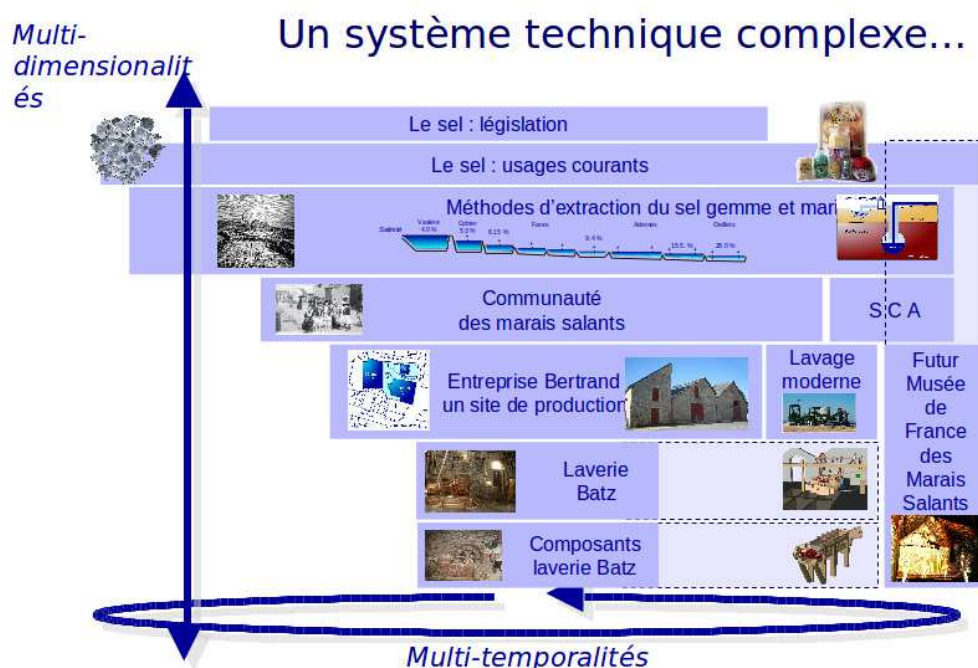


Figure 2.13 – Cas d'étude (présent dans (Laroche, 2007)) de la machine à laver le sel présentée à l'éco-musée de Batz-sur-mer. La figure montre les différents schèmes à étudier, permettant de re-contextualiser le cycle de vie de l'objet.

Ce postulat permet d'affiner la structure de la méthodologie introduite dans l'hypothèse 1²⁵ comme réponse à la problématique industrielle. Nous proposons en effet de nous appuyer sur un système d'organisation des connaissances (couplé à des interfaces métiers) pour supporter le processus de patrimonialisation et la mise en place d'un PLM muséologique.

2.5 Valorisation du patrimoine par le numérique

Nous l'avons vu, la mise en valeur du patrimoine est au cœur de la mission des musées. Cependant, le développement des outils numériques a permis de remodeler profondément la façon d'interagir et de valoriser les objets patrimoniaux et les connaissances historiques.

La liste des projets existants ne peut être exhaustive tant le nombre d'initiatives a explosé depuis 10 ans. Le nombre de revues scientifiques dédiées à la question (*International Journal of Heritage in the Digital Era*, *Journal of Cultural Heritage*, *Journal of Computing and Cultural Heritage* pour ne citer que ceux-là) ainsi que les conférences internationales en sont d'ailleurs un bon exemple.

Dans cette partie, nous verrons quels sont les approches et les outils utilisés pour la conservation, la numérisation et la valorisation des objets patrimoniaux.

2.5.1 Valoriser la recherche en histoire

La valorisation est définie par le Comité National d'Évaluation comme l'ensemble des « moyens de rendre utilisables ou commercialisables les résultats, les connaissances ou les compétences de la recherche ». Il ne s'agit pas ici d'un seul transfert de technologie mais plus d'une forme d'appropriation des savoirs acquis par les citoyens.

Cette phase de valorisation, inhérente au fonctionnement du musée, doit donc être anticipée lors du processus de patrimonialisation. La valorisation muséographique doit ainsi permettre de rendre utilisables

²⁵ La valorisation d'un objet patrimonial peut servir de support à l'élaboration d'une méthodologie de gestion de connaissances pour la muséologie.

les résultats des recherches en histoire et ainsi de leur apporter une valeur ajoutée par leur diffusion à un public plus large.

2.5.2 Muséographie et interactivité

La muséographie se confronte actuellement à deux bouleversements socio-techniques :

1. l'évolution constante des technologies, notamment par le biais du numérique ;
2. et l'évolution du comportement des visiteurs, de plus en plus demandeurs d'interactivité.

Or les musées privilégient le plus souvent des approches unidirectionnelles pour la diffusion du savoir, l'institution étant détentrice de la connaissance liée à notre patrimoine. Pourtant, Internet a grandement contribué à un changement social important : la demande de plus en plus pressante de nouvelles formes de participation. Réseaux sociaux de toutes natures, blogs, l'utilisateur devient acteur et les musées sont naturellement impactés par cette nouvelle approche du public. (Vidal, 2012; Rouquette, 2007; Vidal, 2006)

VIDAL explique dans (Vidal, 2006) que « le multimédia peut-être vu comme un moyen d'associer l'usager à la démarche du musée et d'aller au delà de la simple réception des contenus ».

Dans (Cordier *et al.*, 2011), les auteurs insistent sur le phénomène d'augmentation de la revendication des individus à exister comme porteurs d'une intelligence du monde. Par conséquent, les auteurs préconisent de considérer le public du musée autrement que comme une simple clientèle. Le musée doit plutôt faire évoluer ses pratiques en tirant profit de l'apport du public. Les dispositifs de médiation permettent donc selon les auteurs de créer un partenariat plaçant le public en « émetteur influent sur le discours ou l'événement auquel il lui est donnée de participer » (Cordier *et al.*, 2011, p. 34). Cette forme de co-construction des savoirs nous donne des indications sur l'approche à considérer pour la diffusion et la capitalisation des connaissances historiques en contexte muséal.

En ce qui concerne l'interactivité et son intérêt pour la médiation auprès des publics, (Mabilot, 2000) ajoute que la technologie n'est pas la difficulté majeure liée à la conception d'applications interactives. Pour l'auteur, « la réelle difficulté est celle d'une culture qui dans ce besoin d'une inflation technologique cherche à masquer son "incapacité", sa crainte de se servir des outils d'aujourd'hui. ». Les technologies de l'interactivité numérique bouleversent donc les approches de médiation et les liens entre producteur et utilisateur. Cet aspect est à retenir à la fois pour la conception d'interfaces de valorisation des connaissances, mais également pour la méthodologie qui doit prendre avant tout en compte l'utilisateur final. Cette question est bien sûr déjà connue des professionnels du musée, mais n'est pas toujours appliquée, notamment dans le domaine de la recherche (Rahaman *et Tan*, 2010).

D'un point de vue conceptuel, les auteurs de (Rahaman *et Tan*, 2011) décrivent la partie de la méthodologie relative à la diffusion des connaissances pour la valorisation et l'interprétation du patrimoine.

Tout cela nous amène à considérer l'importance d'une approche anthropocentrée pour la conception d'une méthodologie de patrimonialisation.

2.5.3 Le numérique et ses enjeux

Pour les musées

Nous l'avons vu, le numérique impacte fortement les processus fonctionnels et organisationnels du musée. Il s'agit désormais de repenser les formes d'approche au public et les exemples de dispositifs visant à proposer de nouvelles expériences sont légion :

- Nintendo 3DS au Louvre
- Nantes en 1757 au musée d'histoire de Nantes
- Géo-caching et géo-rallyes dont le but est d'explorer de manière ludique un site géographique au moyen de balises géolocalisées
- Circuits touristiques par applications mobiles

- autre exemples

La littérature souligne l'intérêt du numérique pour l'interactivité des interfaces de visualisation pour les musées (cf. 2.5.2). Quel que soit le niveau de technologie utilisé pour les différentes applications envisagées (Réalité virtuelle, Réseaux sociaux, Contribution), le numérique permet de repenser et d'innover en terme d'expérience muséale et d'acquisition de connaissances.

Grâce au numérique, il devient possible de proposer de nouvelles expériences en et hors les murs du musée.

Pour la recherche

COTTE explique que l'usage du numérique « complète et fait évoluer les méthodes de l'histoire, de l'archéologie, du patrimoine ou de la muséographie, en offrant des possibilités nouvelles de compilation et de mise en scène des connaissances » (Cotte, 2009). Le numérique permet ainsi d'assister les méthodes de travail des historiens et des professionnels du patrimoine, sans toutefois les remplacer.

À titre d'exemple, on peut citer le cas des champs de l'archéologie et de l'histoire de l'architecture. L'évolution des technologies a permis d'en faciliter les usages et leur appropriation. Ainsi, les représentations 3D sont désormais couramment utilisées pour rendre compte d'un lieu, vestige du passé, ou d'un bâtiment.

De nombreux programmes de restitution ont vu le jour avec différents objectifs et différentes méthodologies (Fleury, 1997; Frischer *et al.*, 2000; Guidi *et al.*, 2005; Frischer, 2008; Prévôt, 2013). De la simple conservation numérique à la « visite immersive » en passant par la simulation numérique ou la vérification d'hypothèses, l'utilisation du numérique permet d'explorer de vastes champs de recherche par les interfaces de visualisation que cela permet.

Cette utilisation massive des technologies numériques a soulevé la question de la validité scientifique des artefacts virtuels produits. Les chartes de Londres et de Séville proposent donc un cadre méthodologie pour garantir le socle scientifique pour l'utilisation de procédés de visualisation numérique.

Désormais, il est intéressant de noter que les projets de recherche tendent à intégrer aux programmes de restitution une dimension scientifique nécessaire pour rendre compte du travail historique sous-jacent. Cette mise en place d'un système de gestion des connaissances se retrouve aussi bien dans des projets de valorisation du patrimoine technique (comme pour la figure 2.14) (Michel, 2009; Benoit *et al.*, 2010; Laroche et Kerouanton, 2010) que pour la restitution d'édifices patrimoniaux (Stefani, 2010; Baldissini *et al.*, 2009; De Luca *et al.*, 2005) (voir figure 2.15)



Figure 2.14 – Maquette virtuelle fonctionnelle du Canot à vapeur de 1861 d'après (Laroche *et al.*, 2010b)

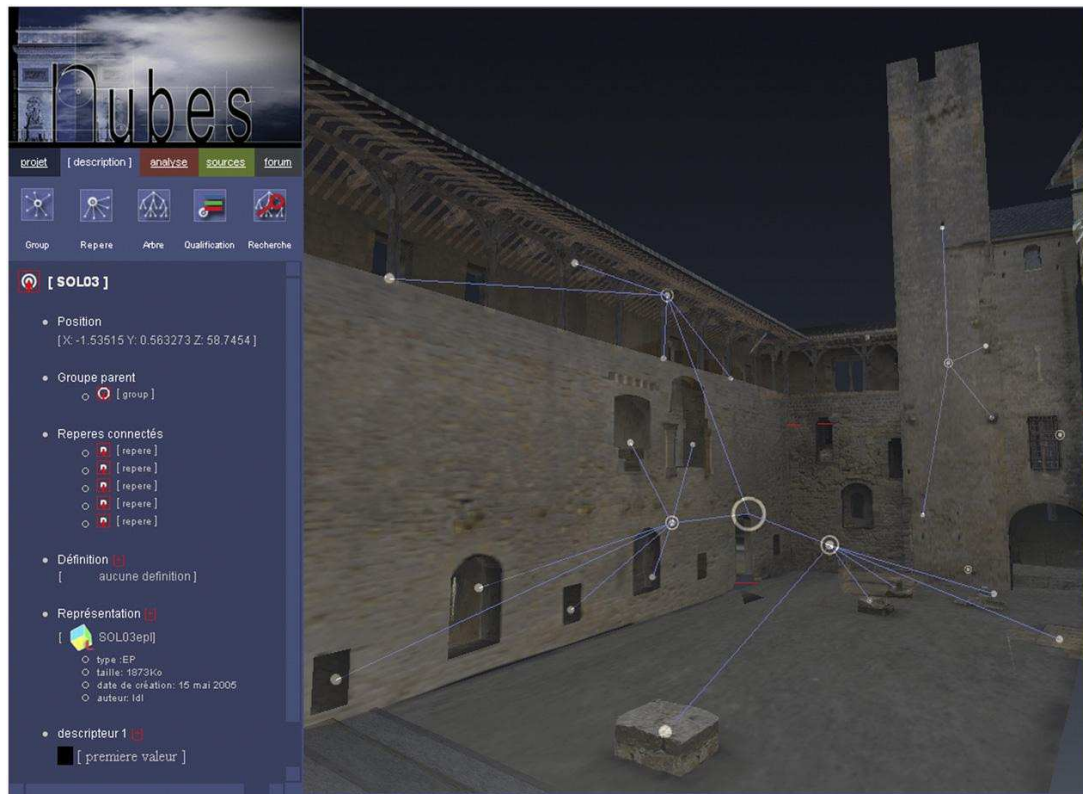


Figure 2.15 – Description sémantique d'une œuvre architecturale par (De Luca *et al.*, 2011)

Désormais, en plus de ces interfaces de gestion et de valorisation du travail de recherche, nous voyons apparaître des interfaces immersives. La réalité virtuelle permet d'accroître les possibilités d'interaction avec le patrimoine, et d'apporter des éléments de restitution complémentaires des vestiges du passé (Philippe Dubé et Courchesne, 2012).

L'utilisation du numérique, et des interfaces de réalité virtuelle par exemple permet ainsi de définir les contours d'une nouvelle forme de muséologie, plus durable, où l'interaction avec notre patrimoine n'est plus limitée à une expérience muséographique isolée mais qui au contraire s'inscrit dans des expériences plurielles. L'objectif est alors « d'amener le visiteur de musée dans un champ sémantique plus complexe et plus riche sur le plan cognitif, à cause notamment des qualités immersives de ces modes de présentation » (Philippe Dubé, 2006).

Bien sûr, cette nouvelle forme d'appropriation du passé ne se limite pas au contexte muséographique mais peut également servir d'outil de recherche pour l'historien, l'archéologue ou le conservateur.

Bernadette Flynn souligne l'importance de la dimension humaine pour la compréhension du patrimoine et de notre histoire (Flynn, 2008) :

- L'essence du patrimoine immatériel ne peut être saisie que par une mise en situation
- La visualisation permet une meilleure interprétation du passé
- Il ne s'agit pas seulement de représenter un objet, mais son contexte, les dynamiques de l'époque

Mark Gillings ajoute que la visualisation n'est pas suffisante pour permettre à l'utilisateur une expérience complète du passé. Il propose donc d'immerger l'utilisateur dans un environnement hyperréel en utilisant la réalité virtuelle (Gillings, 2005). Ces auteurs soulignent avec d'autres l'importance de l'expérience « vivante » (Gabellone, 2009; Flynn, 2008; Gaitatzes *et al.*, 2001).

Nous avons vu que les historiens s'accordent à dire que les objets n'ont de sens que s'ils sont accompagnés de l'expression et des explications des hommes qui les ont créés, utilisés ou développés. Yves Thomas et Catherine Cuenca expliquent dans (Thomas et Cuenca, 2009) que le numérique ou le virtuel peuvent contribuer à introduire la dimension humaine dans des composantes matérielles.

En conclusion, nous proposons ici de poser l'hypothèse suivante :

Hypothèse : La méthodologie basée sur une gestion des connaissances historiques permettrait de proposer des éléments d'aide à la décision pour la création du récit historique en pilotant la visualisation des données par les connaissances plutôt que par les données physiques.

Ce postulat vise à définir les enjeux de la méthodologie émergente et qui sera formalisée dans le chapitre 3 pour la recherche en histoire. Il s'appuie sur un constat issu de l'état de l'art qui identifie l'importance du pilotage de la visualisation en fonction du contexte de recherche. Les chapitres 3, 4 et 5 s'attacheront à apporter des éléments de validation de cette hypothèse ou bien de souligner les limites de ce qui aura été proposé.

2.6 Verrous scientifiques et hypothèses de recherche

2.6.1 Problématique scientifique

Le contexte de la thèse CIFRE pose les contours de la problématique industrielle comme illustré au chapitre 2. Il s'agit de valoriser un objet des collections du musée d'histoire de Nantes : la maquette du port de Nantes en 1900. Afin de valoriser de manière pérenne et interopérable cet objet, en accord avec les résultats issus de (Laroche, 2007), il convient donc de capitaliser l'ensemble des informations disponibles et ainsi de constituer le produit numérique final, tel que décrit dans le DHRM.

Mais comment gérer des données d'un cycle de vie produit complexe tout en permettant un accès multi-utilisateurs et collaboratif à ces informations ?

Afin de répondre à cette problématique, le cadre méthodologique proposé dans la thèse de Florent Laroche (Laroche, 2007) est le plus adapté comme point de départ conceptuel. Il convient désormais de mettre en place un dispositif opérationnel permettant d'encapsuler l'ensemble des connaissances historiques. La validation de la méthodologie proposée pourra se faire via la mise en place d'un système d'information lié à la maquette du port de Nantes et des connaissances disponibles qui s'y rattachent.

La problématique principale peut être illustrée par le schéma 2.16 : le processus de patrimonialisation doit accompagner le besoin de conservation des œuvres du patrimoine culturel avec lesquelles il devient possible d'interagir. Ce processus est assisté par différents dispositifs agissant à différents niveaux selon les acteurs concernés et les données manipulées, entre réel et virtuel.

2.6.2 Hypothèses de recherche

Les différentes hypothèses de recherche que nous posons ici découlent des hypothèses jalonnant l'état de l'art présent dans ce chapitre. Notre première hypothèse concerne le développement d'une méthodologie dédiée à la muséologie.

Hypothèse 1 : La méthodologie de patrimonialisation d'un objet muséographique permettrait d'optimiser la conception de dispositifs muséographiques et d'assister le processus de conservation.

Cette première hypothèse peut se décliner selon deux axes. Le premier axe concerne la problématique de valorisation muséographique en optimisant la gestion des connaissances.

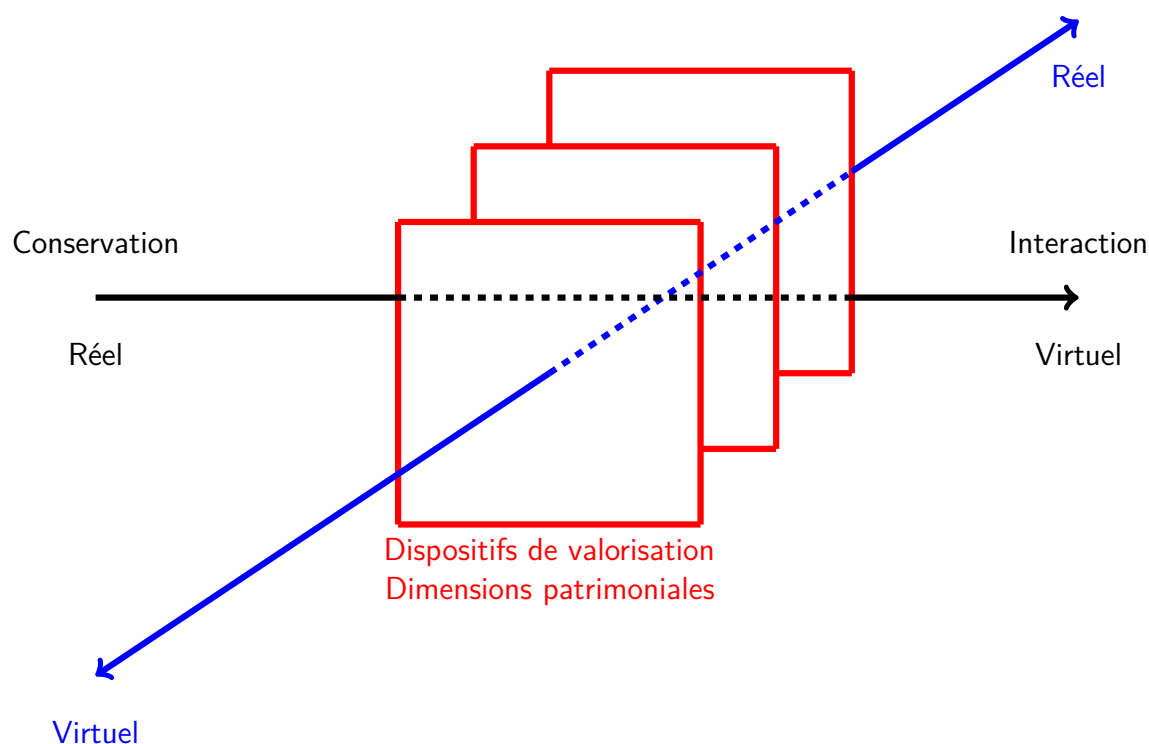


Figure 2.16 – Articulation des problématiques scientifiques et industrielles : le choix d'un dispositif de valorisation adapté se positionne à différents niveaux du processus de patrimonialisation et à différents niveaux d'interaction entre monde réel et virtuel.

Hypothèse 1-a : La méthodologie de patrimonialisation d'un objet muséographique permettrait de capitaliser les connaissances au cours du processus de conception de dispositifs muséographiques et ainsi d'assurer la reproductibilité de la méthode.

Le deuxième axe est associé à la gestion du cycle de vie de l'objet patrimonial et des connaissances associées.

Hypothèse 1-b : La méthodologie de patrimonialisation d'un objet muséographique permettrait d'assister les experts conservateurs et historiens dans le processus de conservation et de création des connaissances.

Notre deuxième hypothèse concerne l'apport des outils numériques de visualisation pour répondre à la problématique de gestion et de capitalisation des connaissances à la fois du point de vue épistémologique et opérationnel.

Hypothèse 2 : Le système d'organisation des connaissances historiques permettrait de piloter les interfaces d'accès métiers par les connaissances pour mieux les capitaliser.

Encore une fois, nous choisissons de décomposer l'hypothèse 2 en deux sous-hypothèses, l'une liée à la problématique industrielle et l'autre à la problématique d'historiographie.

Hypothèse 2.1 : Le système d'organisation des connaissances historiques permettrait d'optimiser la conception des dispositifs muséographiques grâce à une intégration des données et des processus métiers en amont de la phase de valorisation.

Hypothèse 2.2 : La méthodologie basée sur une gestion des connaissances historiques permettrait de proposer des éléments d'aide à la décision pour la création du récit historique en pilotant la visualisation des données par les connaissances plutôt que par les données physiques.

Ces différentes hypothèses sont écrites ici comme des postulats que nous souhaitons valider dans le cadre de ce travail de recherche. Elles permettent cependant de construire une méthodologie cohérente en terme d'objectifs à atteindre.

2.6.3 Approche proposée

Afin de valider les hypothèses 1 et 2 et donc de répondre aux problématiques scientifiques et industrielle, nous souhaitons définir une approche permettant d'utiliser les outils des sciences de l'ingénieur (gestion de connaissances et visualisation d'informations notamment) pour capitaliser les connaissances historiques et les valoriser.

Approche produit

Dans l'objectif de comprendre comment intégrer, modéliser les données manipulées et les connaissances produites, il est nécessaire de comprendre les produits manipulés, c'est-à-dire les objets patrimoniaux et les différents artefacts de représentation de ces objets. Si la nature des produits considérés est très différente de celle habituellement considérée dans le monde industriel, nous pensons qu'une démarche globale d'analyse systémique peut permettre de valider les hypothèses.

Pour ce faire, nous proposons de démontrer comment associer les sources historiques aux différents produits manipulés et comment cette association va permettre de créer le dossier d'œuvre numérique au cœur du DHRM.

Approche processus

Dans le cas de nos recherches, la prise en compte des spécificités métiers de même que les processus en jeu est cruciale. Ces travaux de recherche sont largement pluridisciplinaires et il convient de montrer comment la démarche doit être transdisciplinaire.

Nous proposons donc de détailler les différents métiers concernés ainsi que les différentes étapes entrant en jeu dans le processus de patrimonialisation.

Conclusion

Le tableau 2.5 récapitule les différents verrous scientifiques identifiés pour répondre à la problématique ainsi que les hypothèses de recherche à valider.

Table 2.5 – Récapitulatif des verrous scientifiques et des problématiques de recherche

Constats	<ol style="list-style-type: none"> 1. une approche multi-dimensionnelle est essentielle tant pour la gestion des données produits liées aux objets patrimoniaux (temporalités, échelle spatiale, niveaux de détails) que pour la gestion des processus métiers (conservation, écriture du récit historique, visualisation des données) (cf. chapitre 1) ; 2. les outils PLM actuels, bien qu'ils apportent des éléments conceptuels ne permettent pas de répondre à la problématique de gestion des données liées aux œuvres du patrimoine culturel ; 3. le DHRM propose un cadre théorique complet et validé pour la gestion des connaissances historiques, mais est difficilement applicable tel quel pour un contexte muséal ; 4. les outils numériques permettent de supporter l'activité de visualisation et de capitalisation des connaissances pour la compréhension et la gestion du patrimoine culturel.
Problématiques	<ol style="list-style-type: none"> 1. Capitaliser les connaissances historiques à partir d'objets patrimoniaux. 2. Organiser les connaissances pour une valorisation multi-modale.
Solutions	<p>Hypothèses envisagées :</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. La méthodologie de patrimonialisation d'un objet muséographique permettrait d'optimiser la conception de dispositifs muséographiques et d'assister le processus de conservation. 2. Le système d'organisation des connaissances historiques permettrait de piloter les interfaces d'accès métiers par les connaissances et de mieux les capitaliser.
Validation	Chapitre 3 pour les hypothèses 1 et 2. Chapitre 5 pour l'hypothèse 2

Chapitre 3

Proposition d'une méthode de capitalisation de connaissances en contexte muséal

Le chapitre 2 a permis de mettre en évidence les différents critères à prendre en compte pour une patrimonialisation scientifique et pérenne. Nous avons vu que le DHRM, par sa similitude avec les approches de modélisation du génie industriel, permet de garantir une base de modélisation éprouvée lorsqu'il s'agit de capitaliser les connaissances autour d'objets patrimoniaux. Cependant, il s'agit désormais, en accord avec le contexte industriel, de s'intéresser à la mise en œuvre du DHRM en contexte muséal et aux formes de valorisation qui en découlent. Ce chapitre propose une approche produit-processus pour la gestion de la patrimonialisation depuis la conservation jusqu'à la valorisation.

La méthodologie associée met en œuvre un système d'organisation des connaissances permettant de gérer la capitalisation des connaissances et de piloter les interfaces de visualisation par ces connaissances.

Comme nous l'avons vu dans le chapitre 2, depuis une dizaine d'années, avec l'essor des technologies de numérisation, conservation et valorisation, le patrimoine culturel fait l'objet de nombreux travaux de recherche visant à définir de nouvelles modalités d'interaction de compréhension et de diffusion.

On peut par exemple citer la création de plusieurs revues scientifiques (JOCH¹, JOCCH², JOHDE³, etc.) dédiées à la question du patrimoine culturel en lien avec l'utilisation de ces technologies de plus en plus répandues. De même, le nombre de conférences scientifiques ne cesse de croître : sociologie, archéologie, muséographie, les champs disciplinaires concernés sont nombreux.

On ne peut en effet que constater l'impact de ces outils sur la problématique de conservation et de diffusion du patrimoine culturel. Les technologies numériques permettent autant de répondre à certains aspects des besoins actuels des sciences humaines que de créer de nouvelles modalités d'interaction et d'exploration.

Pourtant, il n'existe toujours pas de méthodologie outillée formalisée pour la gestion du processus global de patrimonialisation allant de la conservation à la valorisation et la diffusion des connaissances. Il existe certes de nombreux travaux proposant des méthodes détaillées pour la numérisation (3D ou 2D) d'artefacts, notamment en archéologie, ou pour la structuration des données à destination du web de données (nous faisons ici référence aux travaux basés sur l'utilisation des technologies du web sémantique

¹Journal of Cultural Heritage

²Journal of Computing and cultural heritage

³Journal of Heritage in the Digital Era

cités en section 2.4.5 du chapitre 2), mais il n'existe pas à notre connaissance de méthodologie couvrant l'intégralité du processus de patrimonialisation. Ceci peut sans doute s'expliquer par la complexité et la diversité du patrimoine culturel, de même que par le profil pluridisciplinaire des équipes de recherche.

Concernant les outils de gestion des connaissances pour le cycle de vie des produits industriels, nous avons vu qu'ils ne sont pas adaptés à une démarche de structuration inversée. Plusieurs cycles de vie imbriqués viennent perturber l'analyse rétrospective d'un objet patrimonial. D'ailleurs, les temporalités de l'histoire telles que définies par BRAUDEL (temps long ou géologique, temps moyen des activités humaines et le temps court des événements) ajoutent en complexité pour comprendre la vie d'un objet (Braudel, 1969).

Une solution possible pour la gestion des données historiques — et souvent utilisée au vu de la littérature existante — semble être l'utilisation des technologies du web sémantique en lien avec des ontologies de domaine dédiées au patrimoine culturel (comme le CIDOC-CRM). Ce type d'approche, combinant des modèles formels — pour caractériser les entités et leurs relations — et des outils adaptés permet d'automatiser certains traitements (analyse de textes, comparaisons) et de proposer un socle commun pour l'interopérabilité des silos de données (pour l'extraction et la recherche informatisée d'informations). Cependant, cette solution nécessite des processus lourds à mettre en œuvre, notamment pour l'alignement des modèles. De plus, elle ne permet pas d'avoir un accès multi-point de vue à l'information (l'ontologie étant définie par consensus entre experts), et la construction collaborative du savoir doit se faire *a priori* et non de manière itérative.

Enfin, l'historien interprète les données d'une certaine manière *a posteriori*, ce qui nécessite que le modèle n'impose pas de vision pré-définie lors de l'intégration des connaissances dans le système envisagé. L'objectif pour nous est alors de permettre aux experts de capitaliser leurs connaissances et de faire émerger des notions qui sont instanciées *a posteriori* dans le modèle.

À cette problématique liée au travail de l'historien et à l'historiographie s'ajoute ici la problématique des activités associées au patrimoine culturel : conservation, archivage, inventaire, valorisation et médiation.

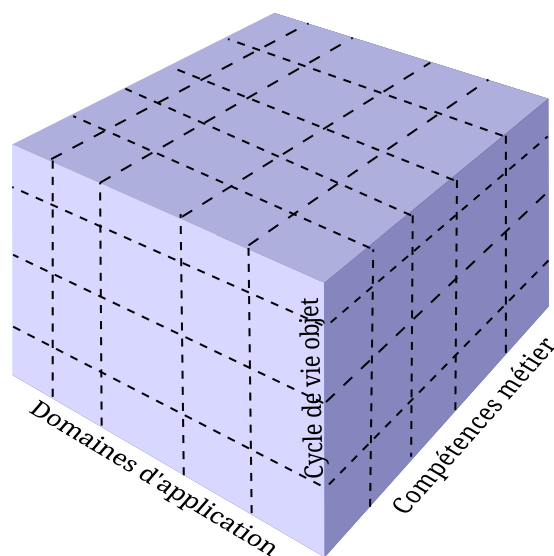


Figure 3.1 – Représentation schématisée des objectifs. Le cube représente l'articulation entre les compétences métiers, l'objet patrimonial et les champs d'application possibles.

La figure 3.1 illustre la problématique d'organisation des connaissances. Elle représente à la fois le processus de capitalisation, faisant intervenir des connaissances multiples selon les étapes du cycle de vie de l'objet, mais également le processus de valorisation ou de diffusion où les différents métiers et applications accèdent à des informations multi-dimensionnelles.

Parmi les domaines d'application possibles à prendre en compte, on peut citer :

- la muséographie

- l'archivage
- l'urbanisme
- l'ingénierie (conception et rétro-conception, innovation)
- l'archéologie
- l'historiographie

Les compétences métier sont dépendantes de l'objet : historiens, conservateurs, ingénieurs, experts métier, utilisateurs témoins, etc. Chaque acteur permet de reconstituer une partie du « puzzle » que constitue l'œuvre patrimoniale, tout au long de son cycle de vie. À partir de ce puzzle, chaque domaine d'application peut alors s'appuyer sur un socle de connaissances consolidé pour leur réutilisation de le contexte souhaité. Par exemple, la compréhension de la chaîne de production d'un artefact ancien à partir des archives d'entreprise pourrait permettre d'assister la recherche d'innovation dans la conception de nouveaux procédés de fabrication. Tandis que la connaissance du contexte socio-économique pourra enrichir le discours de médiation du musée ou permettre de valider des hypothèses de recherche en histoire.

C'est pourquoi nous proposons une méthodologie et un méta-modèle pouvant être spécialisé et enrichi via les interfaces d'accès avec une gestion des profils des différents acteurs du système. La méthodologie se veut donc intégrative et collaborative. Le profil des acteurs utilisateurs influence donc la structuration des données dans le système et leur visualisation.

Dans ce chapitre, nous décrivons une méthodologie reproductible s'appuyant sur des concepts du génie industriel, et ayant pour objectif de répondre, au moins de façon partielle à cette problématique de patrimonialisation en contexte muséal. Du point de vue opérationnel, l'approche proposée consiste d'abord à généraliser la problématique industrielle afin d'élaborer un cadre conceptuel adapté au contexte de l'étude⁴ (cf. figure 3.2).

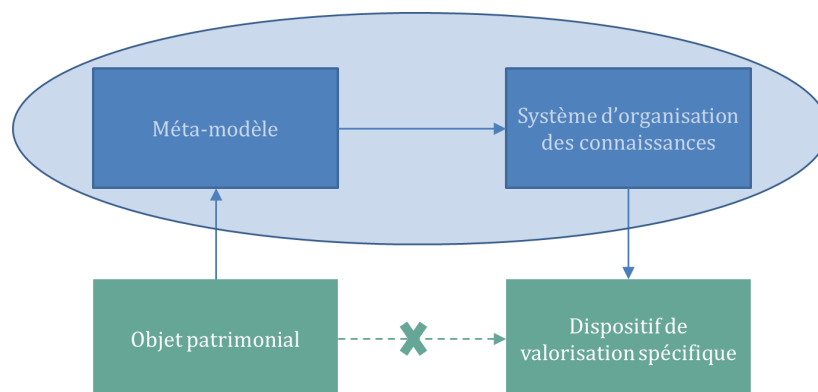


Figure 3.2 – Illustration de la démarche envisagée pour l'élaboration d'une méthodologie

Il s'agit ici de décrire l'ensemble des utilisateurs et fonctions nécessaires à la mise en place d'un framework de patrimonialisation. Ce framework constituera le socle de l'ensemble des processus associés à la structuration, l'intégration et la diffusion des connaissances liées au patrimoine. Nous détaillerons également les tâches pouvant être automatisées, celles qui semblent pouvoir le devenir dans le futur, et celles qui à notre connaissance nécessitent une approche manuelle.

3.1 Processus global de patrimonialisation

La figure 3.3 propose un schéma illustrant le processus global de patrimonialisation (Laroche, 2007).

⁴À titre informatif, l'approche proposée peut s'apparenter à une démarche de résolution des problèmes telle que celle proposée dans l'algorithme ARIZ de la théorie TRIZ (méthodologie algorithmique de résolution de problèmes techniques élaborée par Genrich Altshuller (Altshuller, 1997).

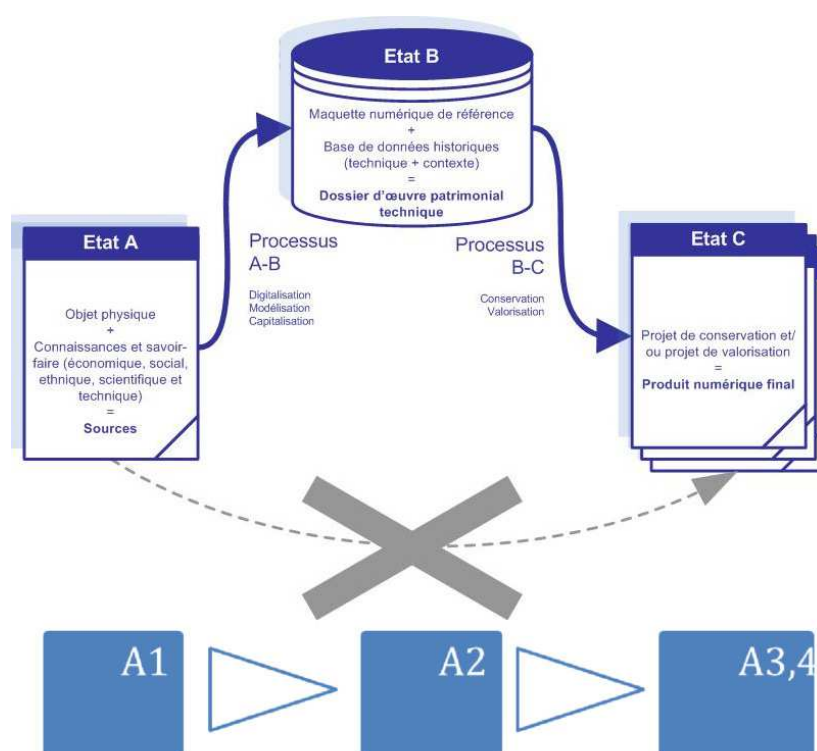


Figure 3.3 – Méthodologie générale pour la conservation du patrimoine technique et industriel d'après (Laroche, 2007, p. 211) et liens avec la vue processus de la figure 3.4

Nous proposons ici de détailler et d'enrichir d'un point de vue opérationnel et méthodologique les différents états et processus en jeu proposés sur ce schéma :

1. identification et numérisation
2. modélisation
3. valorisation

Les trois états A, B et C sont ici associés à une vision processus décrite de manière globale par la figure 3.4.

Nous nous attarderons principalement sur les processus de modélisation (A2), de valorisation (A3), et d'enrichissement (A4), la phase de numérisation étant décrite dans de nombreux travaux et pour de nombreux domaines de recherche (archéologie, archéologie industrielle, conservation dans les musées). De plus, il s'agit pour nous de fournir des outils et d'automatiser certains traitements pour assister l'historien sur l'analyse de ses hypothèses de recherche.

De plus, nous proposons de rajouter à ce processus global une phase supplémentaire : une boucle de rétro-action visant à intégrer dans le système les nouvelles connaissances produites à partir de l'exploration et de l'analyse des données existantes. Cette rétro-action doit également permettre à l'utilisateur de modifier ses hypothèses en enrichissant le méta-modèle. De manière prospective, il s'agit de partir d'un ensemble d'informations connues et disponibles comme point de départ et d'agrégier de manière itérative de nouvelles connaissances à partir des manques identifiés.

Ainsi, les trois états A-B-C ne forment que l'état 0 du processus global de patrimonialisation.

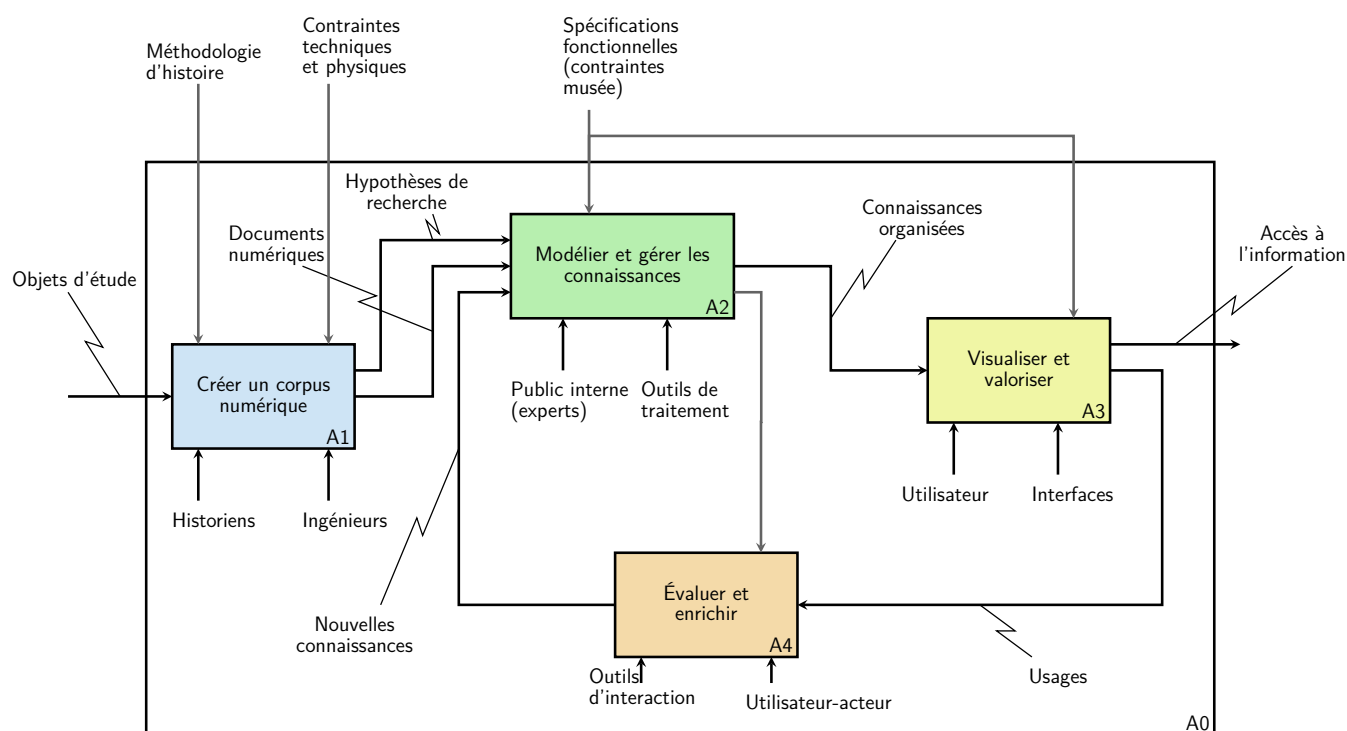


Figure 3.4 – Diagramme SADT de description du processus global de patrimonialisation.

3.2 Constitution d'un corpus numérique de référence

La première étape du processus est à la base du travail de l'historien et consiste à établir un corpus de sources historiques primaires et secondaires⁵ pertinent au vu du sujet d'étude. Les experts concernés pour la réalisation de cette étape sont les historiens, et les conservateurs pour les objets ayant déjà atteint la phase de patrimonialisation de leur cycle de vie, ainsi que tous les experts utiles au décryptage de ces sources (dessins techniques, plans, fichiers CAO, langues étrangères). Plusieurs spécialistes (en économie, politique, ou technologie) doivent donc participer à cette première étape du processus de patrimonialisation. En effet, une approche interdisciplinaire est nécessaire pour comprendre et restituer à la fois la vue interne des objets (structure, analyse systémique) mais également leur vue externe, notamment le contexte socio-économique (c'est-à-dire comment l'objet s'insère et évolue dans son environnement).

Les différentes phases de cette première étape (figure 3.5) sont les suivantes :

1. Construction d'un espace de sujets de recherche, d'hypothèses de recherche
2. Identification des sources nécessaires à l'étude de ces hypothèses
3. Numérisation ou "digitalisation" des sources en vue de leur traitement (objet du travail présenté dans cette thèse)

La phase 1 (sous-activité de l'activité A11) consiste à définir le besoin, qu'il soit à la demande d'un musée ou non, et donc le contexte historique de l'étude, même si celui-ci peut être amené à évoluer. Cette phase va ensuite permettre d'instancier le méta-modèle de gestion des connaissances historiques par le choix des attributs de classe.

La phase 2 (sous-activité de l'activité A11) nécessite d'identifier parmi les fonds disponibles (archives publiques et privées, musées, bibliothèques) l'ensemble des sources présentant un intérêt pour l'étude. Il peut s'agir de sources écrites, iconographiques ou orales, d'artefacts ou de tout autre trace archéologique ou objet de musée. Cet inventaire forme le socle de départ de l'analyse historique.

⁵Par source primaire, nous entendons toute source historique contemporaine n'ayant pas fait l'objet d'une interprétation. A contrario, une source secondaire est un document provenant d'une synthèse préalable de sources primaires.

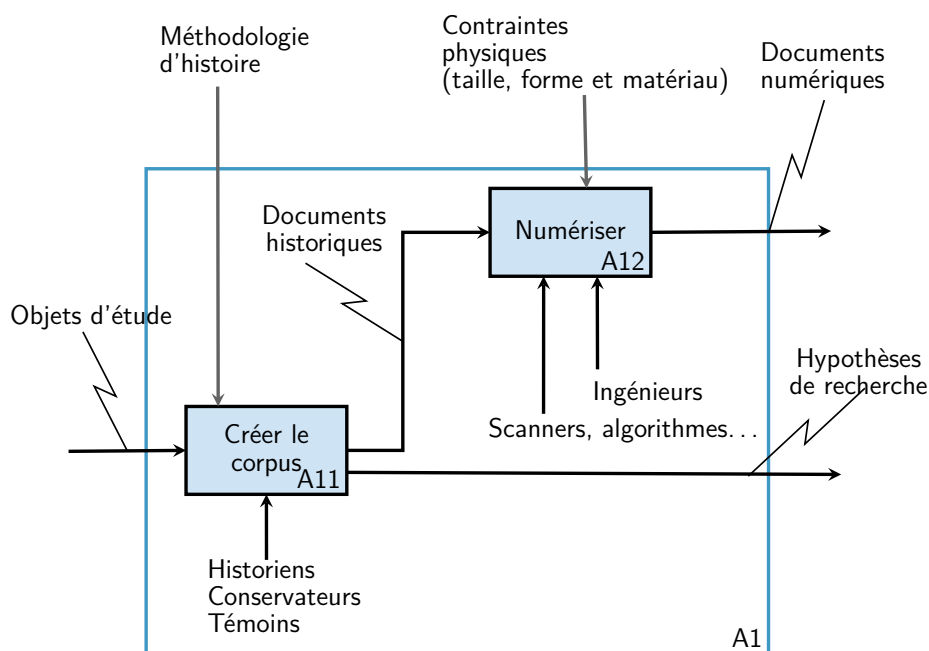


Figure 3.5 – Vue processus de la création du corpus numérique de documents historiques

La phase 3 (activité A12) permet à la fois de répondre au besoin d'archivage à long terme pour la préservation du patrimoine, mais également d'en faciliter le traitement, la diffusion et l'accès.

La classe **Documentation** présente sur la figure 1.3 rassemble les différentes classes manipulées dans cette étape et servira à faire le lien entre les ressources et les objets étudiés (au sens large).

La *documentation* qui servira de socle pour la création du récit historique, c'est-à-dire la mise en forme des connaissances associées aux objets peut donc être caractérisée par deux ensembles :

1. l'ensemble des sources d'informations, le plus souvent des institutions spécialisées comme les archives, mais potentiellement tout individu possédant des **traces**, témoignages de l'existence de l'objet patrimonial et de ses usages ;
2. l'ensemble des types de documents : iconographie, documents texte, multimédias (archives orales ou vidéos), représentations intermédiaires de l'objet 2D ou 3D. Cette typologie permet de différencier la description associée, c'est-à-dire les propriétés de l'objet. Un document iconographique (estampe, carte postale, peinture) aura ainsi un ensemble de descripteurs différents (dimensions, matériau, technique, auteur) de ceux d'une vidéo (durée, format d'encodage) par exemple basés sur le standard MPEG-7.

Capitaliser le maximum d'informations lors de cette première étape est essentiel pour compenser le fait que la granularité de l'étude ne peut pas toujours être définie à l'avance. Le choix des niveaux de détail pourra se faire *a posteriori* au moyen d'interfaces de visualisation et d'interaction.

En conclusion, il s'agit donc de partir des informations existantes et disponibles. Le choix du niveau de détails est uniquement dépendant de l'application de visualisation finale, et ce, en fonction des traces accessibles et du besoin de l'utilisateur final (cahier des charges muséographique par exemple). L'objectif de cette approche est de faire émerger de nouvelles pistes exploratoires à partir de cette construction collaborative des connaissances. Du point de vue épistémologique, il s'agit de proposer de nouvelles méthodes et de nouveaux outils pour l'historiographie et la muséologie. Cette approche s'inspire de la théorie de l'innovation pour la conception C-K ([Hatchuel et Weil, 2002b](#)) proposant des aller-retours entre l'espace des concepts et l'espace des connaissances pour favoriser l'innovation en conception mécanique. L'agrégation itérative de nouvelles connaissances permet d'imaginer de nouveaux concepts, faisant appel à de nouvelles connaissances, et ainsi de suite.

À la fin de cette étape, un corpus numérique ou dossier d'œuvre patrimonial numérique combinant analyse interne et externe des objets est créé. Ensuite, il convient de modéliser et d'intégrer ces connaissances dans un système d'organisation approprié permettant à de multiples acteurs d'accéder à différents niveaux de cette connaissance et de créer le récit historique au moyen d'outils d'exploration de ces données. Nous verrons alors comment il est important de piloter ces interfaces de visualisation par les connaissances produites.

Cette étape est en grande partie manuelle car dépendante du cas d'étude. Cependant, l'utilisation de bases de données existantes ou de systèmes de traitement automatiques du langage⁶ peut permettre d'en automatiser (dans une certaine mesure et sous contrôle) une partie. En ce qui concerne la numérisation, une grande partie du travail peut être assistée par le biais de fonctions ou programmes tiers. Par exemple, si le scan d'un objet 3D est fondamentalement dépendant de la nature de l'objet lui-même (texture, matériau, taille, forme) et impacte donc le choix du scanner, le traitement du nuage de points peut se faire au moyen d'algorithmes de reconnaissance et d'une base de connaissances associée (Laroche *et al.*, 2012).

3.3 Modélisation et intégration des connaissances

La deuxième étape de la méthodologie proposée consiste à modéliser et intégrer des données hétérogènes. Elle est illustrée figure 3.6. Le principal verrou réside dans la gestion de la complexité multidimensionnelle des données manipulées. Nous parlons ici à la fois des objets, techniques ou non et de leur contexte (social, technique, organisationnel). Intégrer de telles données et les connaissances associées implique de proposer un modèle générique pouvant être spécialisé selon le besoin (c'est-à-dire le domaine d'application, cf. figure 3.1).

Les différentes phases de cette étape sont les suivantes :

1. **A21 : Modéliser.** Cette phase de modélisation est préalable à la structuration des données. Il s'agit de choisir le modèle conceptuel adapté aux besoins de l'étude (patrimoine industriel, artistique, religieux, etc.) en fonction des hypothèses de recherche définies par les experts dans l'activité A1. Les descripteurs devant servir à la formalisation des connaissances sont définis, mais le modèle doit pouvoir évoluer avec l'enrichissement du système et la multiplicité des acteurs ;
2. **A22 : Structurer les connaissances.** Il s'agit d'un processus de formalisation des connaissances sous la forme de fiches. Ces fiches constituent l'analyse monographique des **items** qui seront mis en relation dans le système d'organisation des connaissances ;
3. **A23 : Intégrer les données.** Ce processus englobe l'implémentation concrète dans le système des connaissances créées ainsi que leur validation et critique.
4. **A24 : Modérer.** Il s'agit ici pour les experts (service de la conservation du musée et historiens dans le cas de l'étude) de pouvoir modifier les données, les modérer pour une analyse en interne avant mise à disposition sur les interfaces d'accès. Cette activité permet à la fois de mettre en place une boucle de validation des contenus pour le musée mais également de versionner les informations.

La phase A22 consiste en fait en une étape d'écriture de l'histoire avec une analyse critique du corpus documentaire et la mise en relation des connaissances et des sources historiques (traces archéologiques, objets de collection de musée, sources écrites et orales, primaires ou secondaires).

La phase A23 est essentielle pour la validité scientifique des travaux. Elle implique une traçabilité des informations, au moyen de paradata⁷, et une possibilité de débat par plusieurs experts sur le résultat.

⁶Les approches basées sur le NLP ou *Natural Language Processing* sont aujourd'hui très utilisés pour le traitement automatique de documents anciens, notamment leur numérisation ou leur traduction (Berzak *et al.*, 2011)

⁷Les paradata sont des informations descriptives concernant l'intentionnalité de la création de la connaissance : objectif du créateur, indicateurs de fiabilité, etc.

Elle est itérative et nécessite un versionnement des informations.

La phase A24 permet de modérer les informations dans un contexte muséal. En effet, le musée a des critères d'exigence en ce qui concerne les informations accessibles par le public. Par conséquent, une étape itérative doit être mise en place pour valider les informations intégrées dans le système avant diffusion au public. Concrètement, il s'agit de faire autant de vérifications que nécessaire par les services du musée impactés (conservation, médiation, édition, etc.). Une fois l'information validée, son statut lui permet d'être téléchargé sur les différents dispositifs de médiation proposés par le musée. Nous verrons dans le chapitre 4 comment cela peut être mis en place.

Nous avons par ailleurs choisi, pour structurer les connaissances manipulées dans le contexte de l'étude, une représentation atomique sous la forme d'une fiche à l'instar de (Ardans, 2011). Ainsi, chaque sujet historique (élément bâti, événement, personne) se voit attribuer une fiche, vecteur de la connaissance qui s'y rattache, dépendant d'un point de vue, et pouvant être mise en relation et annotée.

Typiquement, une fiche est donc produite, somme des connaissances d'un utilisateur-acteur, à partir de sources historiques. Cette fiche est formalisée dans le système et acquiert des métadonnées supplémentaires (auteur et statut entre autres). Le contenu est ensuite modéré par le musée qui en garantit la validité scientifique, avant que les informations ne soient accessibles au public externe. La phase de modération peut éventuellement impliquer une concertation avec l'auteur. On distingue alors l'ensemble des connaissances associées à l'item, dont l'exactitude n'est pas mesurée, des informations utilisées par le musée pour la conception des dispositifs muséographiques de médiation.

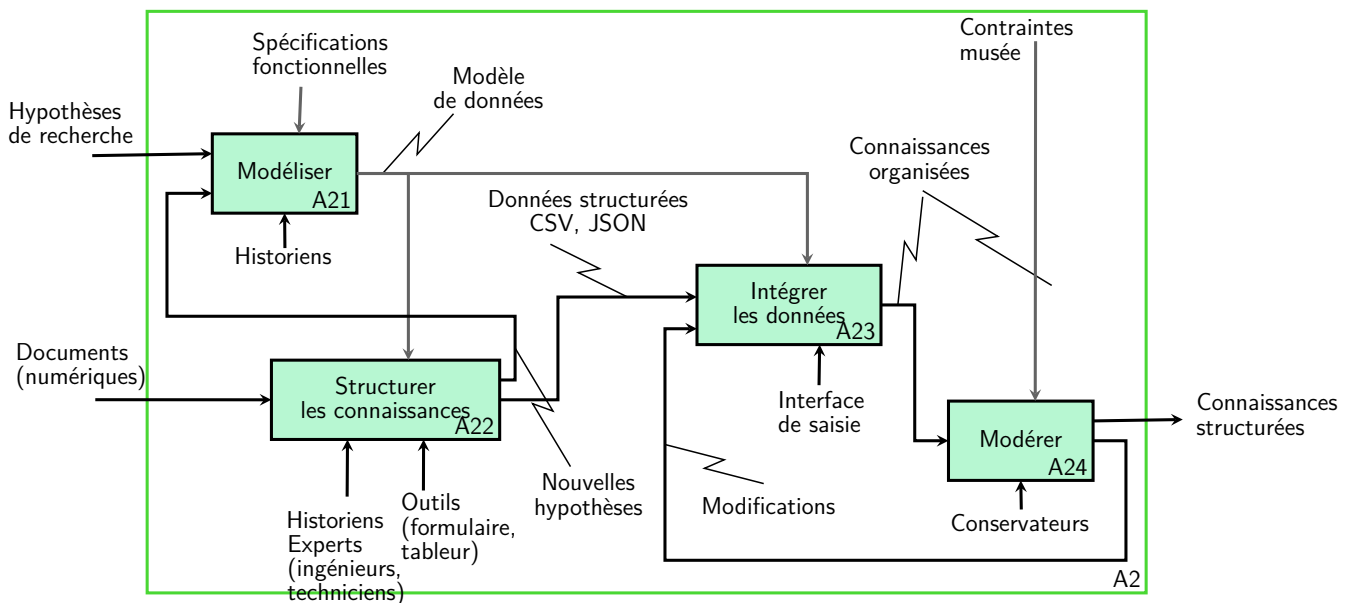


Figure 3.6 – Diagramme SADT de description du processus de modélisation et d'intégration des données.

La gestion des connaissances nécessite de prendre en compte la diversité des acteurs. Sur ce point, nous pensons que l'approche du web socio-sémantique est une source d'inspiration particulièrement intéressante. Le web socio-sémantique propose une approche collaborative pour la modélisation et la recherche d'information (Zacklad *et al.*, 2003). Ainsi, un même item, caractérisé par des attributs peut-être défini selon différents points de vue, et différents thèmes.

Par rapport au méta-modèle proposé dans (Laroche, 2007), nous proposons une extension aux objets autres que techniques : la maquette numérique peut ne pas exister, et la maquette CAO n'est pas forcément la référence. La maquette 3D devient un artefact et est intégrée au corpus. Elle peut éventuellement être créée de manière induite à partir des connaissances et des données disponibles (De Luca *et al.*, 2011; Prévôt, 2013).

Le schème défini dans (Laroche, 2007) est ici intégré dans le système d'organisation des connaissances proposé. La mise en relation des éléments de connaissances explicites permet de composer les schèmes et

donc une reconstitution partielle du DHRM considéré. Le schème peut donc structurer les connaissances associées à l'objet qui porte les valeurs de ce qu'il est entendu par patrimoine culturel. La méthodologie proposée ici permet à la fois d'intégrer des connaissances sous la forme de schèmes par la structure de données en réseau, mais également d'identifier de nouveaux schèmes à partir de l'ensemble des connaissances produites.

En comparaison d'approches basées sur le web sémantique, nous proposons ici une approche anthropocentrée, en faisant l'hypothèse de l'importance des interfaces d'accès pour la création et la diffusion des connaissances.

Il convient désormais de définir une nouvelle catégorie d'acteurs pour le système. En effet, pour englober à la fois le public interne et externe, pouvant être simple spectateur ou bien producteur de connaissances, nous choisissons d'utiliser le terme **utilisateur-acteur** pour définir cette catégorie.

Dans notre cas, la patrimonialisation s'oriente autour du récit que l'on fait d'un objet. On est ici dans un objectif de médiation, le système se veut donc principalement d'interrogation et non plus seulement de représentation. Ainsi, le cœur de la complexité se situe au niveau de la relation entre les briques élémentaires du DHRM, mais la complexité n'est pas seulement spatio-temporelle (sémantique, travail historien, récit historique, validité discours, versionnement, etc.). Il convient donc de pouvoir formaliser et analyser ces relations. La question se pose alors du niveau de sémantique nécessaire à intégrer dans le système pour répondre à cette problématique ce qui implique de déterminer la façon dont on guide la recherche de l'utilisateur final dans le corpus de connaissances.

Le démonstrateur décrit au chapitre 4 permettra de définir les limites du niveau de sémantique choisi et permettra d'identifier des pistes complémentaires pour les champs d'applications non couverts.

Il n'y a pas ici de présupposition de l'organisation globale des données, l'objectif est de comprendre l'objet d'étude (par exemple le territoire représenté par la maquette du port de Nantes), et de constater les enjeux multiples liés à cet objet par une mise en réseau des connaissances disponibles. Le système n'est pas prégnant sur l'organisation des informations mais laisse la possibilité de découverte. Nous pourrions d'ailleurs qualifier ces découvertes potentielles de "surprises".

Le système d'organisation des connaissances se compose de trois entités principales :

- Des fiches rédigées par les experts sur des **items**. Ces items constituent l'ensemble des éléments abstraits ou concrets relatifs à l'étude : personnes, communautés, bâti, composant technique. Chaque item est un élément s'intégrant dans le contexte du sujet d'étude et dont l'analyse est utile pour la compréhension du système qui l'englobe ou auquel il est lié. Il peut donc s'agir d'un simple descripteur servant à la catégorisation d'autres items.
- Des sources historiques, mentionnées dans la partie précédente, permettant de juger de la fiabilité des informations
- Des données quantitatives sur les objets : représentations volumiques (modèles CAO) ou surfaciques (fichiers SHP⁸), référencées ou non dans le temps.

Les fiches peuvent être associées à des données quantitatives lorsque l'information existe et une estimation de la fiabilité des connaissances contenues dans ces fiches peut être évaluée grâce aux sources historiques qui leur sont associées. Ces fiches peuvent également être associées entre elles. L'accent est ici mis sur la mise en réseau des données et des connaissances associées pour une meilleure capitalisation et diffusion de celles-ci auprès des potentiels acteurs, professionnels ou non. Les données quantitatives sont donc modélisées ici de manière abstraite dans le méta-modèle, en faisant l'hypothèse que celles-ci peuvent être modélisées plus finement selon les besoins. Par exemple, un objet patrimonial comme une maquette urbaine pourra être modélisé en utilisant des outils SIG et des modèles comme le CityGML tandis qu'un artefact technique pourra être modélisé de manière plus fine via des outils de CAO.

⁸Le format SHP, ou *shapefile* est un format de données servant au géo-référencement

3.3.1 Mise en relation des « fiches connaissance »

Cette mise en relation est une étape importante du processus d'intégration. Elle peut-être semi-automatisée, soit grâce à des techniques de *text mining* ou de traitement automatique du langage, le plus souvent basées sur LDA⁹ au vu de la littérature existante, à l'aide d'interfaces de visualisation, ou encore au moyen d'inférences intégrées dans le système. Ces possibilités ne sont pas étudiées dans le présent travail de recherche mais sont mentionnées car potentiellement applicables.

La mise en relation peut également se faire de la manière itérative suivante :

1. Créer un nombre n de fiches
2. Associer à ces n fiches un ensemble de mot-clés
3. Pour chaque mot-clé k de chaque fiche i parmi les n
 - (a) Créer un lien entre la fiche i et la fiche k si elle existe
 - (b) Créer une fiche k vierge et un lien entre cette fiche k et la fiche i
4. Rafraîchir le système pour voir apparaître les nouvelles fiches créées
5. Compléter ces nouvelles fiches créées et répéter la procédure

Chaque relation peut ensuite être spécifiée pour permettre l'interopérabilité entre différents modèles de données. Par exemple, un certain nombre de relations peut provenir d'une ontologie de domaine dédiée à l'histoire de l'art, ou au contraire provenir d'un modèle décrivant l'assemblage de composants techniques (norme STEP par exemple). L'hétérogénéité des données manipulées implique que les utilisateurs puissent spécialiser le modèle de manière extensible selon le contexte et les besoins (fonction de la granularité attendue).

Cette mise en relation génère un graphe multi-niveaux $G = (V, E)$ où V désigne les sommets du graphe, c'est-à-dire les fiches connaissances, et E désigne les paires d'éléments de V , c'est-à-dire les relations créées. La représentation sous forme de graphe permet d'accentuer l'importance donnée aux relations dans le système. Les sous-graphes peuvent ainsi représenter des parcours historiques : apparition de l'activité de construction navale à Nantes, production d'énergie, flux de matières premières, flux migratoires, etc. Par ailleurs, de nombreux travaux sur la visualisation de graphes permettent d'améliorer la fouille et l'extraction de connaissances ([Auber et al., 2007](#))

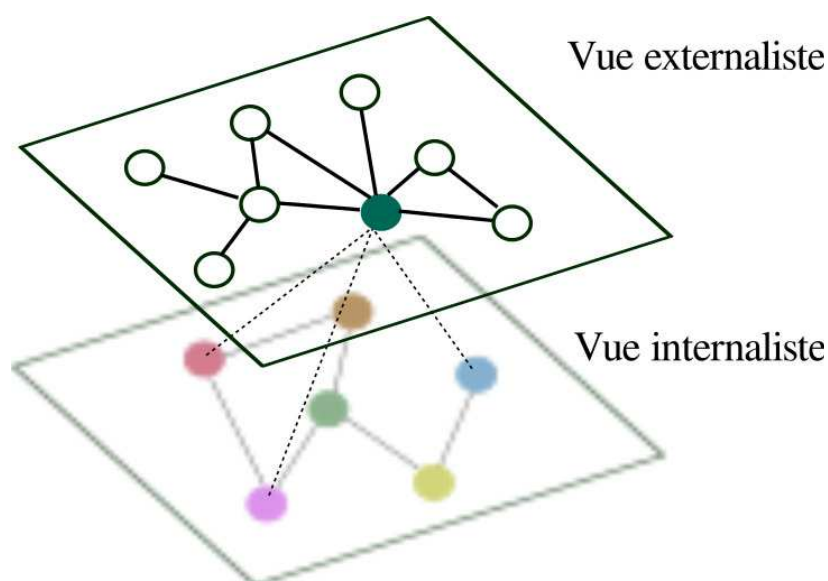


Figure 3.7 – Représentation des liens entre vues externe et interne pour la reconstitution des informations.

⁹Le modèle LDA, ou Allocation de Dirichlet Latente, est un modèle principalement utilisé en apprentissage automatique (« machine learning »)

La figure 3.7 présente seulement deux niveaux. Cependant, chaque nœud peut-être à nouveau représenté sous la forme d'un réseau constitué de deux niveaux. De plus, les nœuds situés sur le niveau correspondant à la vue interne d'un objet peuvent être au niveau correspondant à la vue externe d'un autre objet. C'est pourquoi nous parlons ici de complexité multi-dimensionnelle que l'on retrouve dans le DHRM.

3.3.2 Association des données physiques aux items

Une fois le graphe de données constitué (aspect externaliste), il reste à détailler l'aspect internaliste de chaque item, c'est-à-dire associer à chaque élément du graphe des données structurelles (caractéristiques physiques, position dans l'espace-temps, etc.). Un cas particulier de cette étape pourrait par exemple consister à réaliser un SIG basé sur le réseau sémantique précédemment créé. Il s'agit donc d'associer des attributs spatiaux (délimitation géographique, composant d'assemblage) et temporels (Allen, 1983). Cette étape peut être réalisée en s'appuyant sur des modèles existants comme MADS (Parent *et al.*, 2006), qui propose une typologie de relations topologiques.

Du point de vue des métiers du musée, la vue interne consiste à associer à un objet des caractéristiques propres à sa gestion, comme des informations de conservation (seuil d'exposition lumineuse, température, humidité de l'air, etc.) ou liées à la vie patrimoniale de l'objet (liste des prêts, des expositions, etc.)

Les connaissances stockées sous forme de fiches dans le framework proposé peuvent être théoriquement associées à des données multi-dimensionnelles permettant de caractériser l'infrastructure d'un système. Que ce soit dans le cas d'une machine ancienne ou du port d'une ville par exemple, les approches internalistes et externalistes peuvent être décomposées comme suit :

- étude du système en tant que sous-partie d'un système englobant : analyse du positionnement de la machine dans le contexte du cycle de production d'une usine par exemple, ou bien d'une entreprise en tant que sous-processus d'un processus global (production d'énergie, construction navale)
- étude du système en tant que système englobant : étude de la machine en tant qu'assemblage de nombreux sous-systèmes, eux-mêmes composés d'assemblage de pièces mécaniques, ou bien de l'entreprise comme système complexe, avec tous les produits, processus et ressources servant à la modéliser

Par conséquent, il est possible d'associer des connaissances aussi bien à une entreprise (Ateliers et Chantiers de Bretagne), qu'à son dirigeant ou ses employés, les différents bâtiments qu'elle possède, les machines en fonctionnement, ou encore les différentes pièces de ces machines. Dans le cas de l'étude d'une ville, il est donc difficile d'évaluer *a priori* les niveaux de détails nécessaires lors de l'initialisation du système. Cependant, nous faisons l'hypothèse qu'il est possible d'affiner *a posteriori* la typologie des informations manipulées, au moyen d'interfaces de visualisation. Par exemple, dans le cas du modèle numérisé de la maquette du port de Nantes, nous verrons dans le chapitre 5 des pistes pour la résolution de cette étape :

1. Numérisation d'un objet telle que la maquette du port de Nantes
2. Identification automatique d'éléments présents dans le modèle 3D numérisé, tel que décrit par exemple dans (Chevrier *et al.*, 2010) ou (Laroche *et al.*, 2012). Cette opération pourrait être améliorée à partir d'une base de données de modèles de formes géométriques (toitures, architectures particulières, etc.)
3. Association des connaissances à ces éléments identifiés. Cette phase pourra être assistée au moyen d'interfaces de visualisation adaptées et des modèles de références pour la structuration des données.

3.3.3 Système d'organisation des connaissances pour la conservation et la valorisation du patrimoine

La figure 3.8 récapitule les classes manipulées lors de ce processus de modélisation et d'intégration des connaissances liées au cycle de vie complexe d'un objet patrimonial :

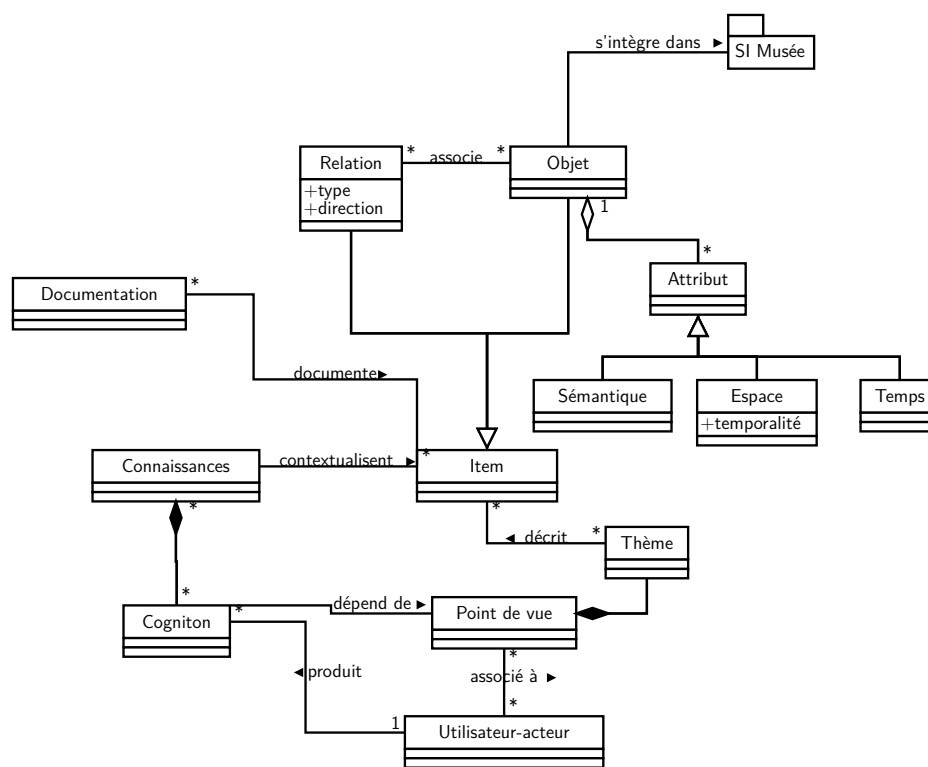


Figure 3.8 – Représentation UML du système d'organisation des connaissances historiques (classes manipulées dans l'activité A2)

- La classe **item** est ici une classe abstraite, permettant d'englober la diversité des données manipulées dans le contexte du patrimoine culturel. Ainsi, un item peut être :
 1. un **objet** au sens large, c'est-à-dire aussi bien un objet physique (par exemple un objet de collection du musée) qu'un sujet ou une thématique. Dans ce deuxième cas, l'objectif est de pouvoir considérer de manière égale les différents schèmes nécessaires à la constitution du DHRM d'un objet patrimonial, c'est-à-dire sa représentation adimensionnelle et atemporelle permettant d'en saisir le contexte. Aux objets physiques, il est possible d'associer des attributs représentant les caractéristiques physiques (temporalité, spatialité) ou sémantiques ;
 2. une **relation**. La particularité ici est l'attribution d'une importance égale à la relation qu'à l'objet. En effet, la compréhension du contexte d'un objet implique de pouvoir aussi bien expliciter l'objet en lui-même que ses relations avec son environnement. Il s'agit de pouvoir décrire les tenants et aboutissants d'une relation entre un chef d'entreprise et son entreprise, dont la complexité peut être aussi importante que les entités en relation elles-mêmes.
- La classe **connaissances** fait directement référence aux connaissances formalisées sous formes de fiches et liées à un **item**.
- La classe **cogniton** est une adaptation du concept proposé par (Serrafero, 2000). Il s'agit ici de différencier les **connaissances** accumulées par les experts relatives à un item et les connaissances élémentaires produites par un expert d'après son point de vue et ses connaissances personnelles.
- La classe **utilisateur-acteur** reprend la définition énoncée plus haut pour caractériser à la fois les utilisateurs du système mais aussi les utilisateurs générant potentiellement de nouvelles connaissances.

Ces utilisateurs-acteurs sont associés à un **point de vue** qui aura un impact tant sur la phase de visualisation et d'interaction que sur la traçabilité des informations du système. En effet, il est essentiel de pouvoir prendre en compte le profil d'un utilisateur pour répondre à ses besoins mais également pour qualifier ses informations dans le système afin de les désambïguiser.

La classe objet est un ensemble englobant les objets patrimoniaux. Par conséquent, ces objets peuvent être présents au sein d'un système de gestion des collections du musée, décrit au chapitre 1 figure 1.3. Le système d'organisation proposé permet ainsi de capitaliser les informations nécessaires pour la construction du DHRM d'un objet patrimonial. La somme des connaissances produite permet de reconstituer les schèmes, projections de l'usage de l'objet par la mise en relation des éléments internes et externes à l'objet. À cela s'ajoute une prise en compte de multiples points de vue liés aux utilisateurs-acteurs pour l'intégration des données mais également l'accès aux connaissances produites. Nous faisons alors l'hypothèse qu'il est possible d'envisager de réaliser une rétro-conception complète d'un objet ancien à partir d'un ensemble de connaissances. Nous tenterons de valider cette hypothèse via le démonstrateur présenté au chapitre 5.

Note : *Les différentes classes constituant le système d'organisation des connaissances décrit figure 3.8 ne sont pas décrites de manière instanciées avec leurs attributs. En effet, la méthodologie proposée suppose que l'instanciation du modèle et donc le choix des attributs des classes découle des choix d'hypothèses lors du projet de patrimonialisation. Par conséquent, selon le type de projet à mener, les objectifs et la nature des items manipulés, les classes pourront être décrites selon plusieurs modèles spécifiques. Cette proposition permet de répondre à la contrainte d'unicité des objets patrimoniaux et la diversité des approches possibles. Le chapitre 4 illustrera cependant comment il est possible d'instancier ce modèle pour la visualisation des connaissances et la valorisation des objets patrimoniaux. La classe **Thème** illustre cette possibilité de multiples descripteurs d'un même item et donc plusieurs instanciations différentes.*

Une fois les connaissances organisées et accessibles, il convient de s'interroger sur la façon d'accéder aux informations stockées, et comment le système se comporte lors de l'interaction avec ces informations. Il s'agit alors de s'intéresser aux processus A3 et A4 de la figure 3.4, c'est-à-dire à l'état C de la figure 3.3. Nous verrons donc quelle surcouche apporter au système pour permettre aux acteurs internes et externes de visualiser et interagir (annoter, modifier) avec les informations stockées. Nous pouvons d'ores et déjà prévoir deux sources potentielles d'interaction : le système lui-même (par le biais d'inférences par exemple) ou bien les acteurs par le biais d'interfaces d'accès.

3.4 Valorisation et capitalisation

La valorisation des connaissances produites est la dernière étape du processus de patrimonialisation. Pour rappel, par valorisation, nous entendons tous les “moyens de rendre utilisables ou commercialisables les résultats, les connaissances ou les compétences”.

Cette phase décrite par la figure 3.9 consiste donc autant en la visualisation des relations entre les items et les connaissances qui s'y rattachent pour le public interne (aspect “utilisable”), qu'à la valorisation auprès du public externe (aspect “commercialisable”).

On vient donc superposer les informations par rapport au repère choisi (espace, temps, niveau de détails, vocabulaire). Le pilotage du système se fait alors par les connaissances. Comme le choix des interfaces et des informations à visualiser est dépendant des critères (profil des visiteurs¹⁰, champ d'application, objectif de médiation). L'établissement d'une grille de décision pour le choix de ces critères et les filtres qui en résultent n'est pas traité ici mais pourra être considéré comme une piste sérieuse pour l'avenir. Cette problématique est essentielle pour le contexte de la muséologie, mais il faut noter qu'elle est commune à d'autres champs d'application comme la création d'assistants ubiquitaires pour l'usine du futur (Dhuieb et al., 2014). La visualisation des connaissances en contexte est donc un enjeu particulièrement critique pouvant être assisté par les outils numériques et les méthodes du génie industriel.

¹⁰Comme détaillé au chapitre 1, les visites guidées du musée sont adaptées en fonction des visiteurs : groupes scolaires de collégiens ou lycéens, déficiences physiques ou motrices, culture, langue, etc.

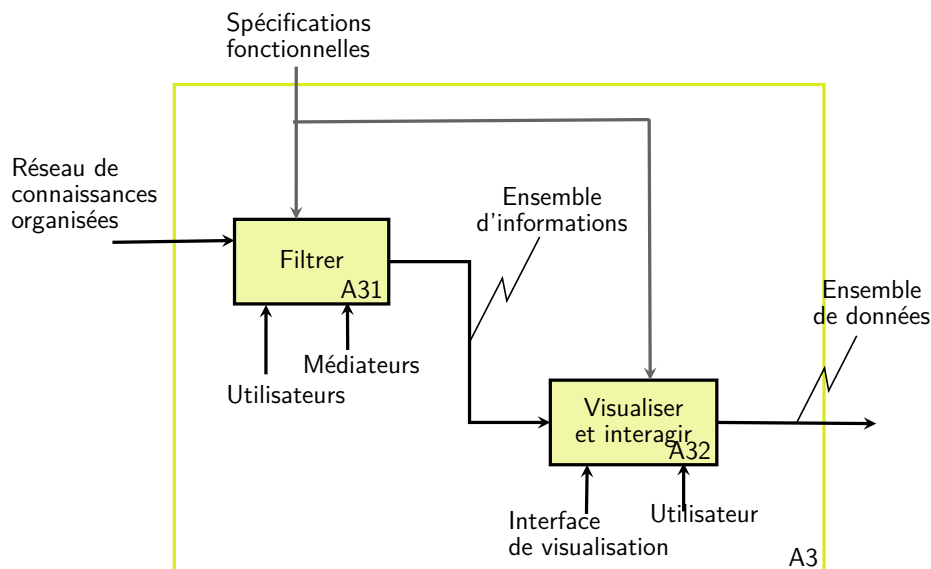


Figure 3.9 – Processus de visualisation et de manipulation d'informations adaptées au contexte d'utilisation

À cette phase de valorisation est étroitement lié le processus de capitalisation (figure 3.10). En effet, l'interaction avec les informations existantes permet de produire, par le biais des publics (internes ou externes), de nouvelles connaissances qui doivent pouvoir être intégrées à leur tour dans le système.

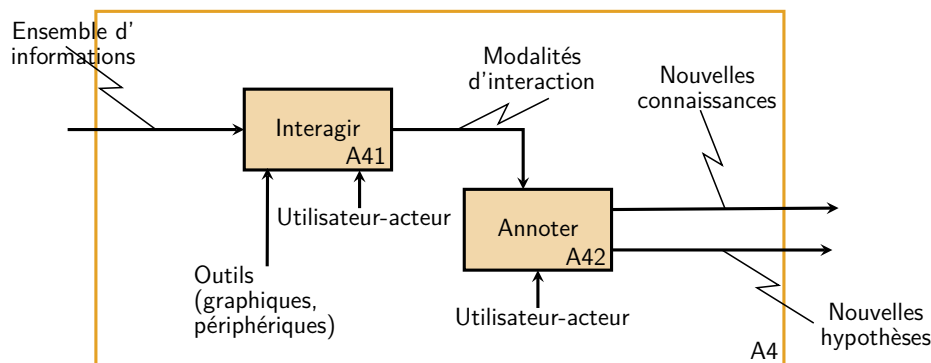


Figure 3.10 – Processus de capitalisation de connaissances en contexte d'utilisation

Cette étape peut se faire manuellement, via des interfaces spécifiques (réalité virtuelle ou augmentée, collecte virtuelle via le world wide web) ou bien de manière automatique au moyen d'inférences permettant au système de proposer lui-même au public interne de nouvelles connaissances possibles.

Dans le cas de l'interface muséographique décrite au chapitre 4, celle-ci permet aux visiteurs d'interpréter l'objet qu'est la maquette du port de Nantes, mais permet également aux professionnels du musée de gérer les informations liées à la maquette (et aux objets qui lui sont liés).

Cette capitalisation permet donc de soutenir le processus de conservation par la mise à jour des informations et la mise en place de connexions avec un système PLM pour le musée. C'est une nouvelle forme d'épistémologie en partie liée au numérique qui reste à étudier (Saleh et Hachour, 2012).

Nous verrons également au chapitre 5 comment les outils de la réalité virtuelle vont permettre d'assister cette étape de capitalisation des connaissances par la visualisation et la manipulation des informations.

La figure 3.11 décrit les processus de visualisation, interaction et de capitalisation de la méthodologie proposée en terme de classes manipulées. Nous considérons que les utilisateurs-acteurs peuvent modifier les connaissances structurées au moyen d'interfaces d'accès. Ces interfaces permettent de visualiser les informations, en fonction de filtres dépendants du type d'application (réalité virtuelle, réalité augmentée) et des utilisateurs (public interne, externe). Au moyen d'annotations et d'outils dédiés, l'utilisateur-acteur peut ensuite intégrer les nouvelles connaissances produites ou les modifications générées au système

d'organisation des connaissances. Ce processus est décrit par le SADT du niveau A4 sur la figure 3.10.

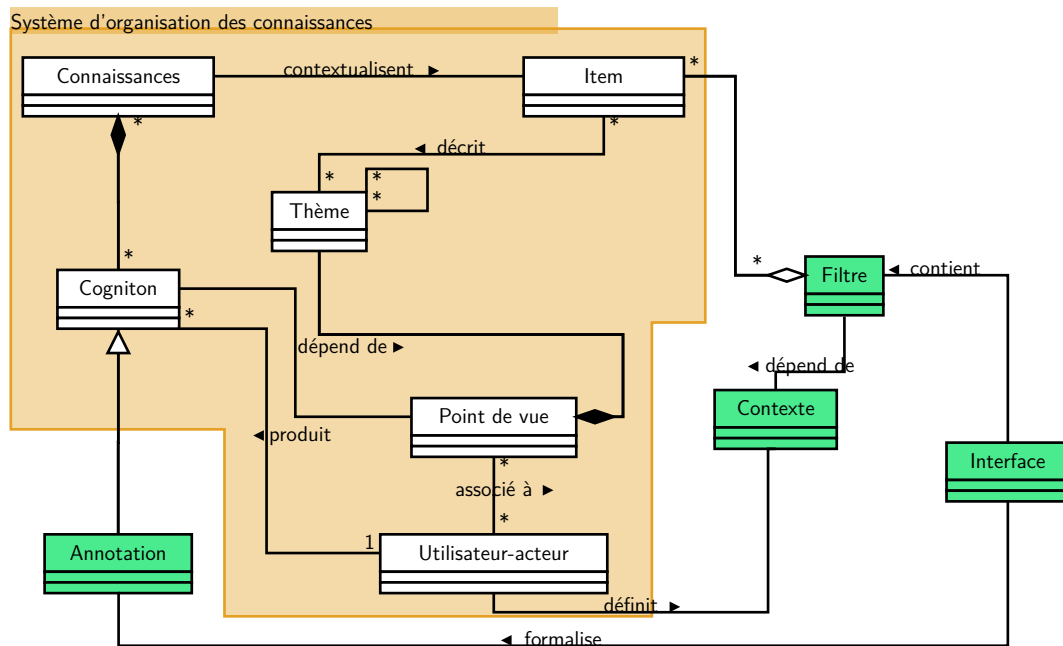


Figure 3.11 – Représentation UML du système de visualisation et d'interaction (classes vertes) piloté par les connaissances du SOC (orange) : activités A3 et A4

L'utilisateur doit ainsi pouvoir, en fonction du contexte, définir un filtre pour la visualisation des informations sur une interface dédiée. À partir d'un accès personnalisé aux informations, l'utilisateur peut alors jouer son rôle d'acteur et intégrer ses propres connaissances, ou bien en créer de nouvelles à partir des modes d'interactions possibles de l'interface. Ainsi, au moyen d'annotations par exemple, ou par la manipulation directe des items, l'utilisateur-acteur crée de nouveaux éléments de connaissances, ou **cognitons**, qui lui sont liés et qui sont alors intégrés dans le système d'organisation des connaissances. C'est la phase de capitalisation. Les nouvelles connaissances formalisées sont alors identifiables comme provenant de l'utilisateur-acteur et peuvent alors être traitées en conséquence (modération, validation, analyse).

Une fois les connaissances organisées et les données accessibles, la problématique est de savoir comment interagir avec le système. Lorsqu'un utilisateur effectue une requête au système, celui-ci fait émerger un résultat. Mais comment capitaliser ce résultat le cas échéant et comment le qualifier dans le système ?

En effet, la possibilité de modéliser et d'intégrer des informations aux contours flous permet de garantir la souplesse nécessaire pour la gestion de données historiques. Or ce flou a ses limites en ce qui concerne l'exploitation des données et l'interaction avec le système pour que celui-ci réponde aux requêtes de manière satisfaisante. Nous montrerons au chapitre 4 comment le niveau de modélisation proposé est suffisant pour des interfaces dédiées à des humains. Il est cependant possible, selon les besoins, d'affiner ces contours flous au moyen d'une ontologie dédiée par exemple si un consensus est possible, ou bien à partir d'un ensemble de descripteurs provenant de l'utilisateur lui-même et qu'il a auparavant assimilés. Nous faisons alors l'hypothèse que cela peut se faire de manière assistée grâce aux interfaces de visualisation une fois l'alignement de modèle effectué. Ce enrichissement du méta-modèle n'est pas démontré dans la suite des travaux présentés ici mais nous proposerons des éléments de validation de cette hypothèse dans le chapitre 5.

À titre d'exemple, le logiciel Karma¹¹ (Knoblock et al., 2012) permet d'aligner des données brutes non ou semi-structurées avec une ontologie définie par l'utilisateur. Dans notre cas, ce logiciel ne permet que d'aligner les méta-données et non de caractériser le type des éléments présents dans le système. De plus, il

¹¹Karma <http://www.isi.edu/integration/karma/> est un outil, sous licence Apache 2, d'intégration de données provenant de sources différentes et conformément à une ontologie au format OWL choisie par l'utilisateur

implique l'adaptation d'une ontologie par l'utilisateur. Cependant, ce type d'outil peut s'avérer utile pour assurer l'interopérabilité avec d'autres systèmes d'accès aux données.

En ce qui concerne l'accès aux connaissances, nous proposons une visualisation centrée sur les relations entre les objets. En effet, ce sont ces relations qui sont porteuses de sens et permettent la compréhension de l'articulation des différents schèmes, donc du contexte du cycle de vie de l'objet patrimonial. D'autres travaux mentionnent l'importance cette forme de visualisation basée sur les relations, notamment dans un contexte de PLM ([Assouroko et al., 2012](#); [Allanic, 2014](#); [Lutters et al., 2014](#)). Nous verrons dans le chapitre 4 un exemple concret pour la visualisation de ces informations.

3.5 Conclusion sur la méthodologie proposée

Rappels :

Nous avons évoqué dans le chapitre 1 la spécificité des éléments à prendre en compte pour la compréhension et donc la contextualisation internaliste et externaliste des objets patrimoniaux. Il était donc important de proposer un méta-modèle multi-point de vue. Cette caractéristique repose dans la méthodologie proposée sur les interfaces d'accès. Outre les fonctionnalités de capitalisation des connaissances et d'aide à la décision pour la recherche en histoire et histoire des technique, le modèle muséologique de référence proposé dans ce chapitre contribue à une proposition d'outil PLM pour les musées. En effet, nous verrons au chapitre 4 comment la méthodologie et le système proposés permettent de formaliser les liens qui existent entre les objets de collection du musée et les informations métiers qui s'y rattachent. Le discours muséographique est en effet un parcours cohérent autour d'objets et de thématiques relatifs au musée. La mise en relation des objets et des connaissances liées à leur vie passée ainsi qu'à leur vie patrimoniale permet de créer de nouveaux modes de gestion des informations et d'interaction avec les objets de collection.

3.5.1 Modèle muséologique de référence pour la gestion de données produits sémantiques

Lien avec le DHRM

Le framework proposé ici s'appuie sur les fondements théoriques démontrés dans la thèse de LAROCHE, via le DHRM ([Laroche, 2007](#)). Les concepts clés du DHRM forment les briques éléments du méta-modèle conceptuel proposé dans ce chapitre :

- les vues internaliste et externaliste permettent de contextualiser l'objet du point de vue de son infrastructure mais également de son imbrication dans son environnement ;
- le dossier d'œuvre contient l'ensemble des documents établissant l'identité, l'authenticité et l'état de conservation de l'objet ;
- les schèmes traduisent le contexte d'utilisation de l'objet, il s'agit de projections dans le passé des cycles de vie d'objets croisant celui de l'objet d'étude.

Ces concepts sont enrichis pour une mise en œuvre opérationnelle dans un contexte muséal. Cependant, il est à noter que certaines classes peuvent hériter leurs propriétés de standards en fonction du domaine d'application et des objectifs. Cela permet de pouvoir caractériser les informations selon des vocabulaires métiers spécifiques ou bien pour des utilisations particulières (moissonnage des données par le web par exemple).

Nous détaillons ici la correspondance entre le modèle conceptuel décrit dans ce chapitre et les ontologies composant le DHRM. En complément et pour faciliter la compréhension des liens qui existent entre les deux travaux, la méthodologie introduite par le DHRM est décrite dans l'annexe B.

Nous avons vu que le DHRM pose le cadre conceptuel pour la contextualisation des connaissances liées à un objet patrimonial. Les travaux que nous présentons dans ce manuscrit visent donc à proposer

une méthodologie pour la mise en place d'un système d'information opérationnel supportant les classes du DHRM. Par conséquent, une fois les connaissances disponibles organisées conformément au modèle conceptuel présenté dans le chapitre 3, on obtient une reconstitution partielle du DHRM.

Il existe donc un lien bijectif entre le DHRM et le modèle conceptuel supportant la parimonialisation proposé dans ce manuscrit :

1. d'une part, les différentes classes décrites dans l'ontologie du DHRM fournissent un cadre méthodologique pour l'identification des éléments nécessaires à la contextualisation d'un objet patrimonial
2. d'autre part, les classes décrites dans le modèle conceptuel de la figure 3.12 permettent d'instancier les classes du DHRM et les liens entre ces classes. Par exemple, les schèmes d'usage d'un objet se retrouvent sous la forme d'une agrégation d'items (ensemble d'objets et de relations)

Le DHRM permet de structurer les connaissances associées à un objet patrimonial par la mise en relation des schèmes d'usage de ce objet et de ses états passés et présents. En ce sens, il s'agit d'un travail sur lequel nous nous appuyons pour l'articulation des classes manipulées au chapitre 3.

Ainsi, dans le cadre du processus de parimonialisation, il convient de couvrir l'ensemble des grandes classes d'équivalences présentées dans le DHRM, à savoir :

- la vue internaliste de l'objet (données structurelles)
- la vue externaliste de l'objet (données architecturales)
- la notion de schème, c'est à dire une projection particulière de l'usage d'un objet
- les documents historiques (ou traces)
- l'homme, aussi bien en tant que sujet d'étude (acteur du passé lié à l'usage des vestiges de l'objet) ou utilisateur des informations contenues dans le DHRM

Par conséquent, nous avons choisi de concevoir le méta-modèle de la figure 3.12 de telle sorte qu'il soit conforme à la méthodologie induite par le DHRM :

- le système d'organisation des connaissances en général et la classe item en particulier (englobant les classes objet et relation) permet d'instancier aussi bien la vue internaliste de l'objet que la vue externalise. En spécifiant les attributs de la classe objet, au moyen d'un enrichissement éventuel du méta-modèle (c'est-à-dire d'une spécialisation de la classe objet), et les relations entre les objets, il est possible de reconstituer l'infrastructure et l'architecture de l'objet, c'est-à-dire les schèmes.
- le système d'information du musée permet de répondre à la problématique spécifique de ce travail de recherche (liée à la commande du musée d'histoire de Nantes) en ajoutant les classes liées à la conservation des objets de collection. Cet aspect n'était pas explicitement mentionné dans le DHRM mais les classes appartenant au SI du musée font entre autres choses partie de la documentation nécessaire à la mise en place du dossier d'œuvre patrimonial. Notons également l'intérêt de la présence de ces classes pour la gestion du cycle de vie muséal des objets. Cela permet de poser des bases méthodologiques pour le couplage avec le système de gestion des collections du musée. Il s'agit d'un objectif double pour l'interopérabilité et l'accès multi-métiers au PLM muséologique.
- le système de visualisation et d'interaction, lui permet d'enrichir le DHRM par l'ajout des classes utiles pour la valorisation des connaissances disponibles, c'est-à-dire des vues partielles du DHRM.

Il faut également mentionner l'enrichissement du DHRM par la prise en compte des utilisateurs-acteurs. En effet, le méta-modèle proposé figure 3.12 permet d'associer aux connaissances présentes dans le système les différents auteurs. Cela permet d'apporter une dimension épistémologique au travail par la traçabilité des informations, aspect nécessaire de la méthodologie de l'historien.

Par ailleurs, précisons que la phase de valorisation muséographique n'a pas été traitée dans la thèse de Florent Laroche. Cette phase était annoncée comme postulat car grâce au DHRM, le Dossier d'œuvre patrimonial technique est décrit dans sa complétude, et tout type de valorisation est alors envisageable. La mise en application du DHRM de manière opérationnelle sur un cas concret (notamment les objets

de musées) était donc annoncée comme une perspective intéressante à de nouveaux travaux de doctorat. C'est ce point en particulier qui est traité dans ce manuscrit.

Conclusion

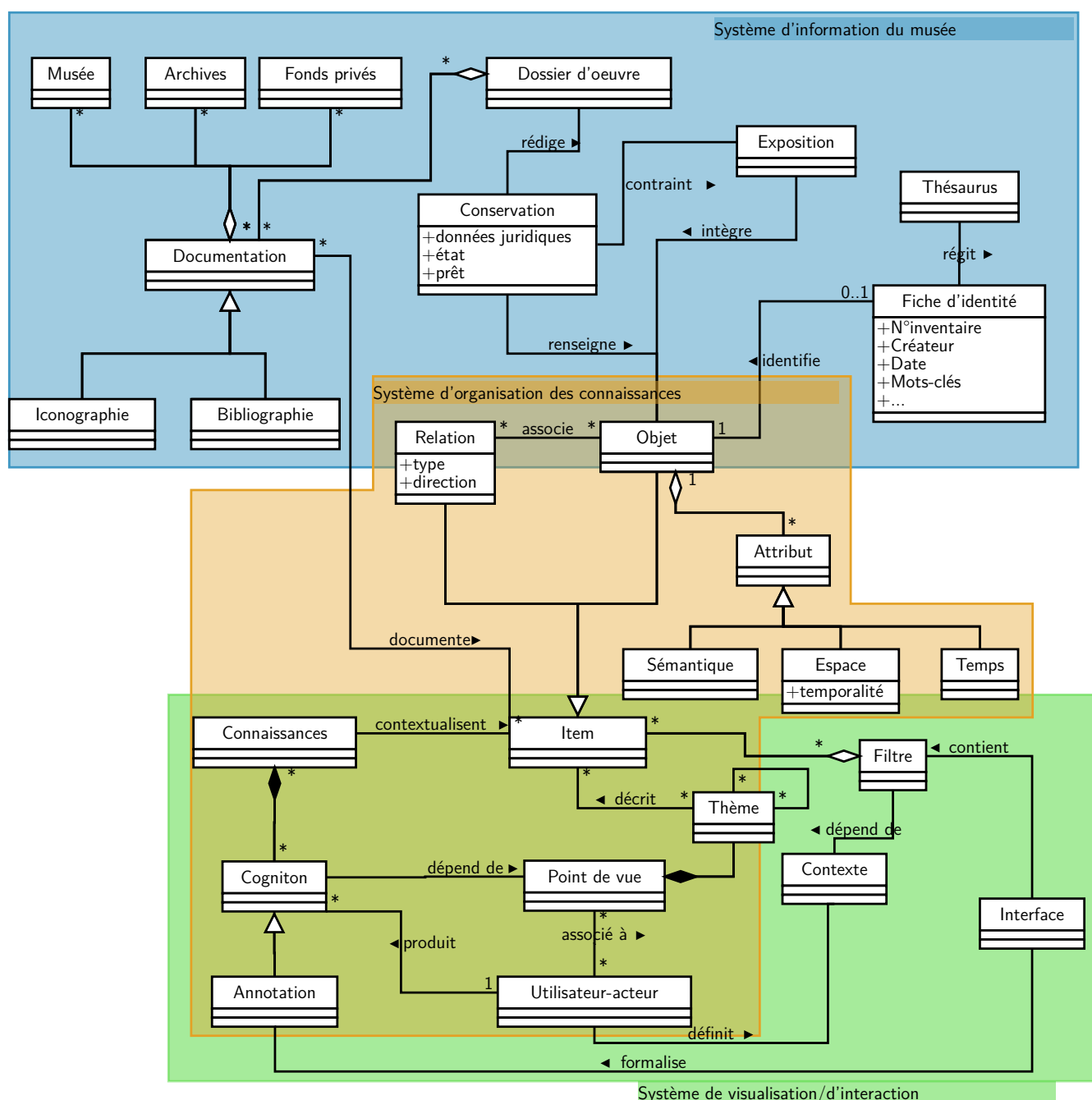


Figure 3.12 – Framework complet proposé pour la capitalisation, l'intégration et la visualisation des connaissances historiques pour la muséologie

Les modèles 1.3, 3.8 et 3.11 permettent de reconstituer le framework global proposé figure 3.12. On retrouve les différents ensembles liés au processus de patrimonialisation :

- Le système de gestion des collections du musée, répondant aux problématiques de traçabilité des informations légales liées aux objets du patrimoine (récolements) et de gestion de la vie de l'objet. Nous englobons dans ce système la gestion de la documentation, pouvant être extérieure au musée le cas échéant ;

- Le système d'organisation des connaissances, permettant de capitaliser les connaissances sur ces objets, et de reconstituer le contexte dans lequel l'objet a évolué ;
- Le système de visualisation et d'interaction, permettant aux publics interne et externe d'accéder aux informations qui les concernent ou les intéressent et sur lesquelles ils peuvent agir.

Le framework que nous définissons permet donc de résoudre la double problématique présentée en introduction de ce chapitre :

- assister les processus de conservation et de valorisation du patrimoine pour la muséologie ;
- permettre la capitalisation des connaissances liées aux objets anciens conformément au DHRM.

Ainsi les connaissances associées aux objets patrimoniaux sont structurées au moyen du système d'organisation des connaissances proposé. Ce modèle conceptuel permet alors de créer l'espace multi-dimensionnel et multi-temporel relatif au DHRM, garantissant l'identification possible des critères d'authenticité et d'intégrité définis par l'UNESCO. Par ailleurs, en associant ce SOC au système de visualisation et d'interaction, notre méthodologie est également conforme aux principaux critères de la charte de Londres :

- *Research Sources*. Une approche basée sur la visualisation assistée par ordinateur doit reposer sur un processus de documentation scientifique basé sur des sources historiques identifiées comme étant pertinentes et analysées.
- *Documentation*. La méthodologie doit être suffisamment documentée afin d'être comprise et évaluée.
- *Sustainability*. Les stratégies employées doivent permettre la pérennité des résultats et de la méthodologie et donc se baser sur les données et connaissances plutôt que sur le médium de visualisation.
- *Access*. La création et la mise à disposition des moyens de visualisation doit mettre en évidence la valeur ajoutée de ces moyens pour l'accès aux connaissances relatives au patrimoine culturel.

La charte de Londres mentionne également le critère lié à l'évaluation systématique des solutions existantes pour le choix d'une solution de visualisation assistée par ordinateur. Cet aspect n'est pas traité par notre méthodologie car il est dépendant des technologies disponibles au temps t de la phase de valorisation. Nous faisons néanmoins l'hypothèse que la méthodologie permet de ne se concentrer que sur une réponse aux usages des utilisateurs, le socle scientifique étant constitué.

Le méta-modèle proposé figure 3.12 permet de poser le cadre méthodologique pour l'instanciation des briques élémentaires nécessaires au processus de patrimonialisation. Il s'agit donc d'une vue conceptuelle décrivant les classes et les liens entre les classes manipulées pour l'organisation des connaissances historiques liées aux objets patrimoniaux. Nous verrons dans le chapitre 4 un exemple d'instanciation concrète de ce méta-modèle et comment il permet de structurer les différents types de données à manipuler.

Vers un système d'information d'entreprise dédié au musée

La méthodologie proposée insiste sur la structuration et l'intégration des connaissances historiques cristallisées autour d'objets patrimoniaux à des fins de médiation et de recherche. Cependant, d'un point de vue conceptuel, il est important de souligner la possibilité d'une interopérabilité avec le système de gestion des collections. En effet, l'approche proposée permet d'apporter de nouveaux éléments de réponse aux problématiques de gestion des informations pour les musées. Le lien entre les applications métiers et les interfaces de capitalisation des connaissances multi-utilisateurs (dont les dispositifs de médiation) va permettre de faciliter les processus métiers existants (collecte, indexation, création de contenus) ou d'en créer de nouveaux (mise en relation des objets de collection, création de parcours thématiques "personnalisés", visites hors les murs, etc.).

En ce sens, le framework et la méthodologie proposés forment une première contribution à la mise en place d'un outil PLM pour les musées, pour la gestion des cycles de vie des objets patrimoniaux. Cependant, la proposition va plus loin que la définition usitée du PLM car nous intéressons ici autant au cycle de vie courant de l'objet (vie muséale), qu'à son cycle de vie passé.

3.5.2 Vision processus globale pour la conservation et la valorisation du patrimoine

Synthèse de la vue processus de la méthodologie

La vision processus globale représentée figure 3.13 reprend le SADT de la figure 3.4 en y détaillant les différents processus de la patrimonialisation.

On y retrouve les principales étapes pour la conservation et la valorisation d'objets du patrimoine :

- la numérisation des artefacts et traces existants. Cette phase englobe également la mise en place éventuelle de modules de communication pour l'interopérabilité avec un système d'information de musée. Ce cas n'a pas été détaillé car il dépend fortement du type de système existant (base de données, formats d'échanges, etc.)
- la structuration et l'intégration des données numérisées en s'appuyant sur un ou plusieurs modèles conceptuels. Cette étape permet l'instanciation du système d'organisation des connaissances, notamment son initialisation. L'étape A21 en particulier permet d'instancier les différentes classes du système d'organisation des connaissances (figure 3.8) en choisissant les attributs en fonction des hypothèses de recherche. Le chapitre 4 proposera un cas concret d'instanciation du modèle
- la visualisation des connaissances formalisées et l'interaction avec le système, permettant principalement la valorisation du patrimoine. Cette étape permet également de préparer la phase de capitalisation
- la capitalisation des connaissances. L'interaction avec le système de visualisation piloté par les connaissances permet de capitaliser de nouveaux éléments de réflexion pouvant à leur tour être formalisés dans le SOC. Cette étape est dépendante du contexte d'interaction, c'est-à-dire le profil de l'utilisateur-acteur et le type d'interface, fonction des objectifs de valorisation : collecte virtuelle, médiation muséographique, création du récit historique.

La vision processus proposée vise à fournir un cadre conceptuel pour la mise en œuvre de systèmes de gestion des connaissances et de leur valorisation qui soient en accord avec les principes scientifiques de l'UNESCO et de la charte de Londres notamment. Cette approche se base, nous l'avons vu, sur un contexte muséologique. Cela implique une analyse fine en amont des possibilités d'interopérabilité avec les outils de gestion des collections du musée.

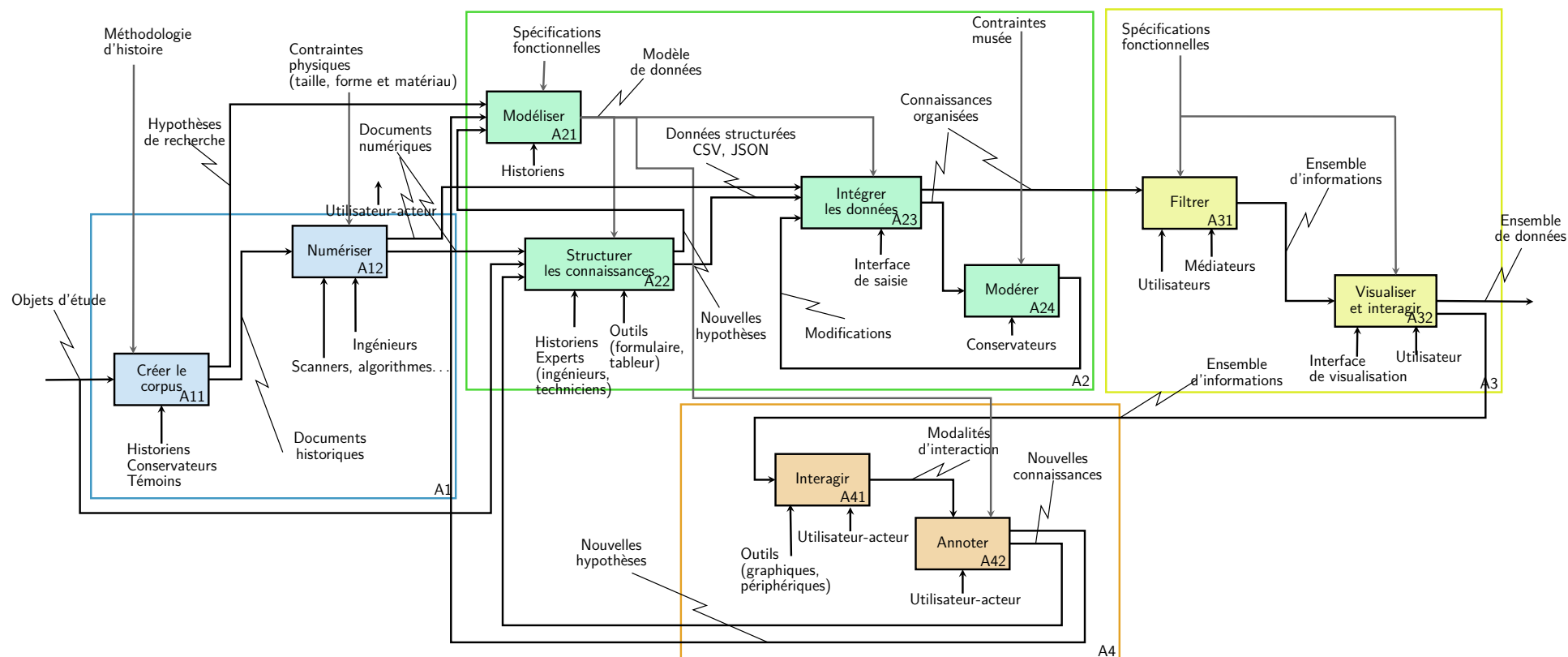


Figure 3.13 – Vision processus globale de la méthodologie proposée pour la capitalisation et la valorisation des connaissances historiques

Illustration du cas du métier d'historien

Dans le but de décrire l'apport de la vision produit-processus proposée dans ce chapitre, nous choisissons d'identifier les différentes phases durant lesquelles intervient l'historien et comment le framework proposé va permettre de valider l'hypothèse 1.b : **La méthodologie de patrimonialisation d'un objet muséographique permettrait d'assister les experts conservateurs et historiens dans le processus de conservation et de création des connaissances.**

La figure 3.1 illustre en effet l'articulation entre les métiers concernés par la patrimonialisation, les objets manipulés et les domaines d'application. Dans le cas de l'historien, celui-ci intervient en amont de la gestion de la vie muséale de l'objet, c'est-à-dire qu'il intervient dans la recontextualisation de l'objet. Il s'agit ici de faire une analyse rétrospective du cycle de vie de l'objet.

Afin de répondre aux problématiques de recherche qui sont les siennes vis-à-vis d'un objet patrimonial (par exemple l'organisation du territoire pour supporter l'activité portuaire dans le cas de la maquette du port de Nantes), l'historien va identifier un certain nombre de documents historiques qui vont constituer son corpus (activité A11). Puis, ses hypothèses de recherche vont permettre, en s'appuyant sur le système d'organisation proposé, de modéliser (activité A21) les différents attributs des classes d'objet qu'il manipule (description d'un objet technique, d'un territoire socio-économique, d'un environnement portuaire, etc.). Il va alors formaliser ses connaissances sur les différents sujets (items) qui rentrent dans le cadre de son étude.

À partir de cette modélisation, le système proposé va l'assister dans l'intégration des données et lui permettre alors de visualiser et d'interagir (activités A32, A41) avec l'ensemble des informations accessibles. Il pourra alors enrichir (activité A42) le système par l'ajout de nouveaux documents, la capitalisation de nouvelles connaissances (par exemple sous la forme d'annotations) ou encore la modification de ses hypothèses, ce qui va impacter la modélisation (rétro-action vers l'activité A21).

En résumé, l'historien peut alors naviguer entre les données virtuelles et réelles, au moyen d'interfaces de visualisation et d'interaction, pour enrichir le socle de connaissances liées à un objet patrimonial. Il contribue ainsi à la patrimonialisation de l'objet (cf. figure 2.16). En somme, le méta-modèle proposé dans ce chapitre figure 3.12 va supporter ses activités de recherche et lui permettre de n'intervenir qu'aux phases A11, A21, A22, A41, A42. Le framework va donc automatiser certains processus dans la création du récit historique et permettre à l'historien d'enrichir ses hypothèses et ses modèles de représentation.

3.6 Conclusion

En conclusion, le processus décrit figure 3.4 et initialement proposé par (Laroche, 2007) figure 3.3 est en fait l'étape n_0 du processus global de patrimonialisation. Cela signifie qu'il s'agit d'une phase d'initialisation. Une fois le framework initialisé, le processus est alors réitéré autant que nécessaire pour la constitution du DHRM complet d'un objet patrimonial. Plusieurs processus peuvent également se dérouler en parallèle, conformément à la diversité des interfaces possibles.

Dans le chapitre 4, nous détaillerons les activités A1 et A2 de la figure 3.13 sur un cas d'application muséal. Puis dans le chapitre 5, nous illustrerons l'activité A3 et proposerons des pistes pour l'activité A4.

La figure 3.14 décrit la méthodologie proposée dans ce chapitre et appliquée à la problématique industrielle liée à la valorisation de la maquette du port de Nantes en 1900, ce que nous démontrerons dans le chapitre 4. À ce problème spécifique que constitue la problématique industrielle de cette étude, nous proposons d'y apporter une solution générique, conçue autour d'une généralisation du problème. Puis, il devient possible de mettre en œuvre une ou plusieurs solutions spécifiques, en fonction des objectifs attendus (dispositif muséographique de médiation, application touristique pour une visite dans la ville, interface dédiée à la recherche, etc.).

Le tableau C.1 présenté en annexe C propose de rappeler chacune des étapes de la vue processus de la figure 3.13 en y apportant des éléments complémentaires relatifs à l'automatisation possible des différentes tâches.

Chapitre 4

Mise en place d'un système de gestion des connaissances historiques pour les musées

Nous proposons dans ce chapitre de mettre en œuvre un système de gestion des connaissances associées à objet de collection du musée d'histoire de Nantes. Le système est conçu à partir des éléments méthodologiques établis au chapitre 3. Le système d'information développé permet de structurer les éléments du corpus historique de référence auxquels viennent s'adjoindre les connaissances du public interne (historiens et conservateurs principalement) et externe.

4.1 Objectifs liés à la maquette du port de Nantes en 1900

Mieux comprendre la maquette en croisant les données historiques avec un outil multimédia, et renforcer le discours muséographique, tels sont les deux objectifs majeurs de la finalité muséologique de ces travaux de recherche. L'objectif étant de valoriser cet objet patrimonial par le biais des technologies numériques, il a été décidé de mettre en place une base de données informatique afin de capitaliser l'ensemble des connaissances historiques relatives au territoire représenté par la maquette. Ces connaissances s'appuient sur un corpus documentaire établi par l'équipe du Centre François Viète de l'université de Nantes et contenant notamment plusieurs centaines de sources iconographiques (cartes postales, photographies, estampes, etc.). Le projet Nantes1900 vise ainsi, outre la conception d'un dispositif muséographique destiné à la médiation culturelle, à concevoir une méthodologie structurée et reproductible dédiée à la valorisation scientifique d'objets patrimoniaux.

Au cœur de cette méthodologie, un des objectifs majeurs est d'assurer une évolution dynamique du contenu, via la participation de publics hétérogènes. Deux catégories peuvent être distinguées :

1. le public interne, composé des potentiels utilisateurs experts du système : conservateurs de musée, historiens, ingénieurs, etc.
2. le public externe, ayant des modes d'appropriation très différents des connaissances

Ces deux types de publics requièrent des considérations différents en terme d'accès au contenu et de mise à disposition des informations. Ce choix de la granularité du niveau d'information proposé en fonction de la typologie de l'utilisateur (c'est-à-dire son profil) devra être géré par les interfaces spécifiques entre le système d'information et l'application de visualisation.

En effet, le projet ne vise pas seulement à concevoir un système interactif à destination des visiteurs du Musée, mais également à enrichir les connaissances disponibles autour de cette maquette historique.

Le dispositif muséographique, lui, mettra à disposition des visiteurs du Musée des écrans tactiles situés devant la maquette, permettant, au moyen d'une interface spécifique, de naviguer de différentes manières au sein du corpus de documents (par thématique, points d'intérêt, zones géographiques, etc.). Le système fournira par ailleurs, au moyen de vidéo-projecteurs, un retour lumineux sur la maquette, dépendant des actions de l'utilisateur.

Au-delà de l'objet assez fascinant que constitue toujours une grande maquette, il s'agit donc ici de pistes de recherche qui concernent non plus l'histoire de la maquette mais l'histoire possible de la ville de Nantes et de son port. Objet démonstratif, la maquette du port de Nantes, constitue un document irremplaçable en ce qui concerne le paysage et l'architecture de la zone décrite. Les propositions qu'il sera possible de développer avec ce nouvel outil devraient permettre une analyse complète des édifices et des paysages dessinés sur le plan-relief, comparés avec d'autres sources contemporaines et avec les traces subsistantes sur le terrain. La maquette du port de Nantes apparaît donc dans toute sa richesse. Objet patrimonial par excellence, elle est bien plus qu'une exceptionnelle pièce de musée. Si elle témoigne bien sûr de la vitalité de la chambre de commerce de Nantes au début du XX^e siècle, elle est désormais un des plus précieux indicateurs de l'histoire de l'architecture et de paysages nantais.

Nous le verrons par la suite, la maquette du port de Nantes est donc un objet de collection unique pour appliquer et valider la méthodologie proposée au chapitre 3. En effet, elle permet une mise en abyme grâce à l'imbrication de données hétérogènes à de multiples niveaux (objets techniques, sociaux, etc.).

Conformément à la méthodologie proposée au chapitre 3, nous proposons une mise en œuvre de l'approche comme illustré par le figure 4.1.

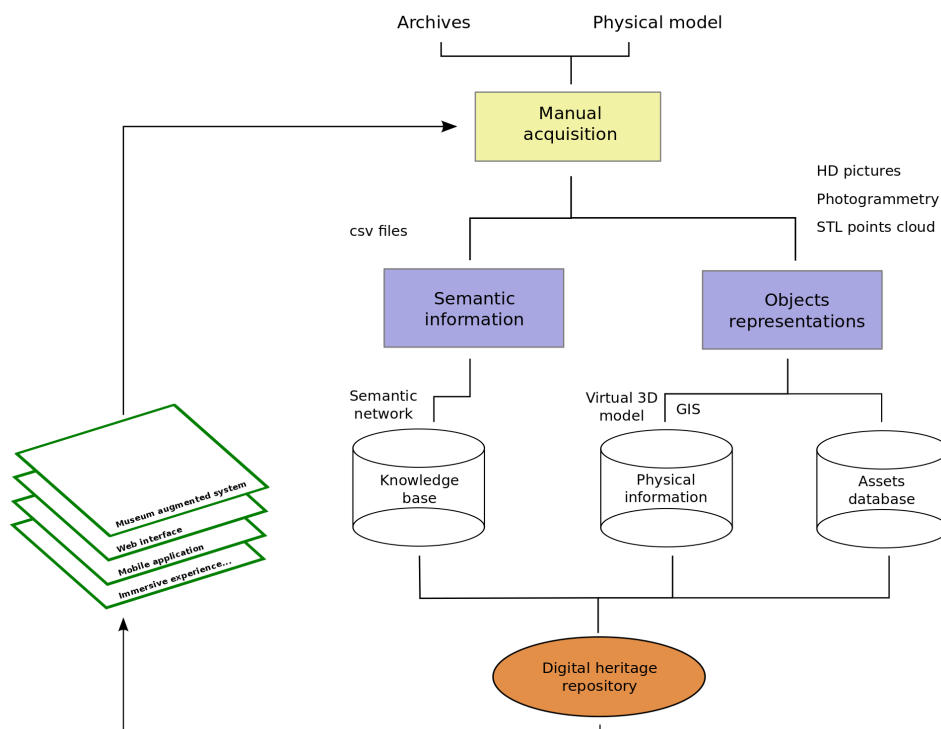


Figure 4.1 – Schéma global de l'approche considérée

4.2 Description des produits considérés

4.2.1 Sources historiques

Le corpus de documents historiques s'appuie sur différentes sources de provenance :

- Les archives du musée d'histoire de Nantes
- Les archives municipales et départementales qui possèdent évidemment une collection de documents (plans, rapports, cartes, etc.) essentiels à la constitution du corpus
- Les collections privées de particuliers possédant des objets ou documents utiles pour l'analyse historique de certains éléments comme les entreprises concernées par l'étude (Lefèvre-Utile — plus connue aujourd'hui sous l'appellation LU — par exemple)

Ce corpus de documents hétérogènes permet ensuite de constituer les fiches « connaissance » rédigées par les historiens. Leur intégration dans le système sera détaillée dans la suite du chapitre.

4.2.2 Objets patrimoniaux

Les objets faisant partie de la collection du musée d'histoire de Nantes et pour lesquels a été appliquée la méthodologie sont les suivants :

- Maquette du port de Nantes de Pierre-Auguste Duchesne (voir le chapitre 1)
- Maquette du quartier Saint-Similien de Nantes de Pierre-Auguste Duchesne (voir la photo 4.5a). Cette maquette a été utilisée pour la conception d'un démonstrateur, étape préalable à la mise en place du dispositif final dédié à la maquette du port de Nantes. Ce démonstrateur était essentiel pour le développement et la validation de l'application interactive selon un cycle en spirale¹.

Ces deux maquettes étant des représentations de différentes parties de la ville de Nantes entre la fin du XIX^e siècle et les années 1920 environ, il est possible de rattacher de nombreux éléments de ces maquettes à d'autres objets patrimoniaux faisant partie du paysage nantais, ou de la collection du musée, entre autres :

- les grands moulins de Nantes, un des premiers bâtiments au monde construit en béton armé (coordonnées : 47°11'60" Nord ; -1°154' 45" Est) ;
- le pont transbordeur, détruit en 1958 ;
- l'église Saint-Similien (coordonnées : 47°13' 13" Nord ; 1°33' 34" Ouest) ;
- les halles Alstom, faisant actuellement l'objet d'une étude de réhabilitation (Quantin, 2014) (coordonnées : 47°12' 20.1" Nord ; 1°33' 39.7" Ouest) ;
- l'ancienne bourse de commerce du palais de la Bourse, actuellement occupée par l'enseigne FNAC (coordonnées : 47°12' 46" Nord ; 1°33' 31" Ouest) ;
- les anciens abattoirs de Talensac (coordonnées : 47°13' 16" Nord ; 1°33' 29" Ouest).

Il est donc possible de faire de nombreux liens, entre passé et présent, entre le virtuel et le réel, entre les objets de musée et la paysage urbain actuel.

4.2.3 Représentations intermédiaires : artefacts virtuels

Les maquettes 3D virtuelles sont un moyen désormais courant de procéder à la conservation des objets patrimoniaux tridimensionnels. Elles permettent à la fois de manipuler des objets souvent fragiles, de mieux les comprendre en permettant une mise en situation virtuelle, et de valoriser les connaissances associées.

¹Le cycle en spirale proposé par Boehm en 1988 est un modèle de développement en génie logiciel qui consiste à concevoir un prototype de manière incrémentale, avec une réévaluation des risques à chaque étape jusqu'au produit final

Certains travaux en ont prouvé la pertinence pour le domaine du patrimoine technique et de l'archéologie industrielle (Cotte et Deniaud, 2005; Cotte, 2009). Cette approche peut ainsi apporter une aide précieuse pour la simple exploration d'un site archéologique, l'analyse d'hypothèses historiques, ou bien la mise en place d'expériences immersives pour les visiteurs.

On peut donc dire que la numérisation assure certains aspects de la pérennité des artefacts patrimoniaux (avec la préservation de l'intégrité quand cela est possible).

Table 4.1 – Exemples de projets de numérisation de maquettes urbaines ou plans-reliefs, présents dans la littérature scientifique

	Nantes	Liège	Toul	Prague	Rome	Pékin
Réalisation	1899	1900	1846	1826	1970	1950
Échelle	1 :500	1 :1200	1 :600	1 :480	1 :250	1 :1000
Surface	17	1	39	20	278.4	75
Numérisation	Scanner laser	Scanner laser	Photos et laser	Stéréoscopie	Laser	Lumière structurée et stéréoscopie
Référence	(Laroche et al., 2010a)	(Billen et al., 2009)	(Chevrier et al., 2010)	(Langweil, 2008)	(Guidi et al., 2005)	(Zhu et al., 2009)

En ce qui concerne les maquettes urbaines ou plans-reliefs², de nombreux projets de modélisation, numérisation et/ou de valorisation existent comme le montre le tableau 4.1. Ces objets font le plus souvent l'objet d'une capitalisation partielle, soit par une expérience de valorisation sans possibilité d'évolution, soit par une modélisation ou numérisation qui n'est pas intégrée dans un projet de valorisation muséographique ni associée à un système d'information historique.

Néanmoins, le tableau 4.2 montre un réel besoin de méthodologie reproductible car le nombre d'objets patrimoniaux de ce type est considérable, ne serait-ce qu'en France.

4.3 Ressources

Les ressources, humaines et techniques mises à contribution sont évidemment considérables. Nous l'avons vu, l'interdisciplinarité est essentielle pour capitaliser le maximum de connaissances et englober les objets d'étude dans leur contexte le plus exhaustif possible.

Parmis les profils d'acteurs du projet, nous pouvons citer :

- conservateurs de musée qui définissent les contours scientifiques et muséographiques du projet. Ils apportent la connaissance essentielle liée à l'objet et au discours scientifique attendu ;
- médiateurs qui travaillent sur le discours présenté aux visiteurs. Ils font partie des utilisateurs finaux et possèdent la connaissance liée au comportement et aux attentes des visiteurs de musée ;
- historiens qui travaillent sur le contenu scientifique, leur analyse et leur validation. Ils mènent les recherches pour la constitution du corpus et font partie des utilisateurs finaux pour le processus d'itération ;

²Cette dénomination est le plus souvent utilisée pour désigner des maquettes à usage militaire

Table 4.2 – Provenance des plans-reliefs de la collection du musée des plans-reliefs à Paris. Source : <http://www.museedesplansreliefs.culture.fr/collections-musee/catalogue.php>

Pays	Nombre de plans-reliefs
France	67
Belgique	12
Italie	6
Allemagne	3
Pays-Bas	2
Autres	7

- ingénieurs travaillant sur la conception du système d'information, l'acquisition des données, leur intégration dans le système d'organisation des connaissances et dans les interfaces de visualisation ;
- développeurs, graphistes travaillant sur l'implémentation concrète des interfaces d'accès ;
- techniciens de maintenance au musée, garants du bon fonctionnement des dispositifs muséographiques.

Plus qu'un travail pluridisciplinaire, il s'agit d'un projet interdisciplinaire et même transdisciplinaire³ en ce sens qu'il s'agit ici d'associer un discours muséographique, un socle de connaissances scientifiques robuste et des utilisateurs finaux divers et variés (dont les caractéristiques et les attentes peuvent varier avec le temps) pour la compréhension de l'homme et des objets qu'il crée pour s'adapter à son environnement.

Concernant les ressources techniques, elles dépendent des différentes phases à mettre en œuvre. Dans notre cas, elles seront décrites au cas par cas pour les différentes processus mis en œuvre.

4.4 Processus mis en œuvre

Nous proposons ici de détailler les processus décrits au chapitre 3 sur la figure 3.13, tels qu'ils ont été appliqués dans le projet Nantes1900. Le dispositif muséographique final n'étant pas finalisé à l'heure où ce manuscrit est rédigé, nous détaillerons en parallèle les données relatives à la maquette du port de Nantes ainsi que celles relatives à la maquette du quartier Saint-Similien.

La figure 4.2 illustre l'application de la méthode présentée au chapitre 3 au cas des maquettes de la collection du musée d'histoire de Nantes.

4.4.1 Constitution du corpus de documents

L'objectif étant de mieux comprendre l'histoire du port de Nantes à travers l'objet de collection, la première phase (cf. figure 4.3) consiste à rassembler et analyser le volume le plus exhaustif possible de

³La pluridisciplinarité consiste à étudier un objet d'une discipline par plusieurs disciplines à la fois tandis que l'interdisciplinarité consiste dans le transfert des méthodes d'une discipline à l'autre. Enfin, la transdisciplinarité concerne ce qui est entre, et à travers les disciplines. Ainsi, la transdisciplinarité « s'intéresse à la dynamique engendrée par l'action de plusieurs niveaux de réalité. [...] Tout en n'étant pas une nouvelle discipline, elle se nourrit de la recherche disciplinaire qui à son tour est éclairée d'une manière nouvelle. [...] La finalité de la transdisciplinarité est la compréhension du monde présent. » (Nicolescu, 1996)

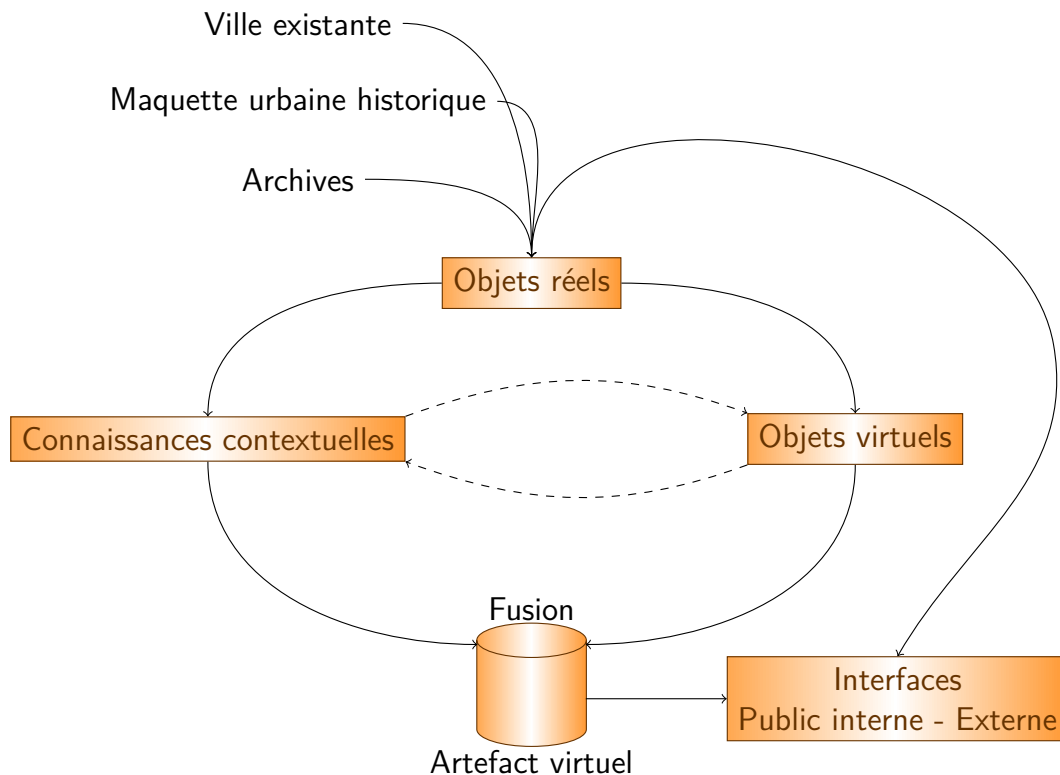


Figure 4.2 – Processus opérationnel pour valorisation des maquettes historiques par la capitalisation des connaissances. Cette représentation est une vue simplifiée de la figure 3.13 qui s'appuie sur le tableau C.1. Le processus sépare l'acquisition des données sémantiques avec les connaissances contextuelles associées et les données physiques. Les applications de visualisation comme le dispositif de maquette augmentée proposé sont connectées au système d'information. Finalement, les nouvelles connaissances issues de l'utilisation des interfaces de visualisation sont capitalisées.

sources historiques.

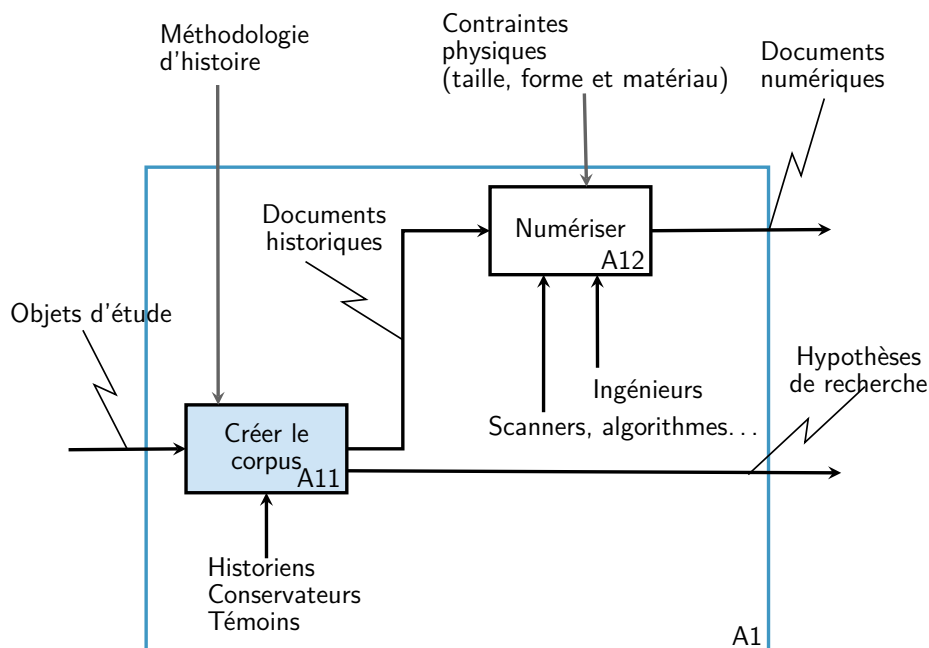


Figure 4.3 – Extrait de la figure 3.13 relatif au processus illustré dans cette section

Cette étape est réalisée par les historiens du Centre François Viète de l'Université de Nantes. Il s'agit de

répertorier d'abord toutes les références de documents d'archives disponibles. Le contexte étant celui d'un milieu urbain, cette recherche passe notamment par les annuaires de Loire-Inférieure⁴ pour l'identification des entreprises et des rues présentes à l'époque. Le bon déroulement de cette étape nécessite une approche méthodique pour couvrir l'intégralité du territoire représenté par la maquette. Elle repose donc entièrement sur le travail des historiens.

En plus des documents écrits, l'importance des documents graphiques est essentielle. Si l'identification de ces documents graphiques n'est pas différente de celle des documents écrits, une précaution supplémentaire est à apporter concernant leur diffusion. En effet, il faut alors distinguer les œuvres tombées dans le domaine public⁵. Dans le cadre du projet, la résolution de cette question doit se faire au cas par cas étant donné la délimitation temporelle de l'étude : seules les œuvres dont les auteurs sont morts avant 1944 peuvent être considérées dans le domaine public. Pour simplifier la résolution de cette étape, si les documents ont bien été identifiés, seuls les documents pour lesquels le musée possède les droits de diffusion ont été choisis pour intégration dans la base de données.

Ainsi, 123 références bibliographiques ont été identifiées pour servir à la rédaction des fiches connaissance. En parallèle, 1071 sources iconographiques ont été identifiées. Parmi elles, des dessins, estampes, photographies, cartes postales, affiches, plans, etc.

Pour le démonstrateur, 236 sources iconographiques ayant une valeur documentaire et 65 références bibliographiques ont été répertoriées.

L'ensemble de ces références a été stocké dans divers documents au moyen de tableurs au format CSV⁶.

4.4.2 Numérisation

La phase de numérisation (cf. figure 4.4) a consisté en 2 étapes : la numérisation des documents graphiques provenant des collections du musée et n'ayant pas déjà fait l'objet d'une numérisation haute définition, ainsi que la numérisation des objets de collection tridimensionnels concernés par le projet.

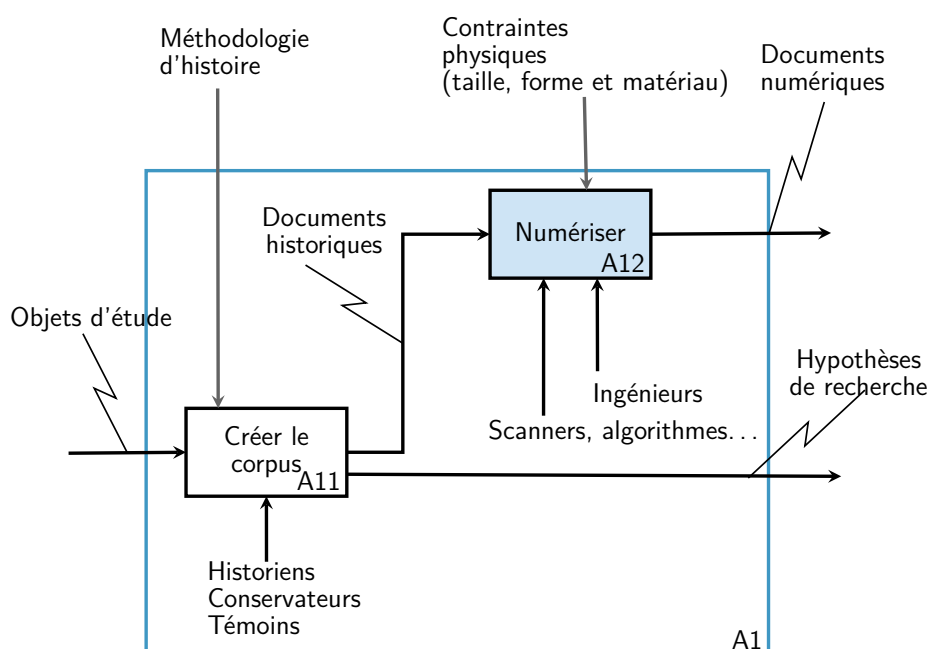


Figure 4.4 – Extrait de la figure 3.13 relatif au processus illustré dans cette section

⁴L'appellation Loire-Inférieure a été utilisée jusqu'en 1957 pour désigner l'actuel département français de Loire-Atlantique

⁵Le domaine public désigne l'ensemble des œuvres n'étant plus soumises au droit d'auteur. Une œuvre tombe dans le domaine public 70 ans après la mort de l'auteur.

⁶Le format CSV ou *comma separated value* est un format texte délimitant les colonnes au moyen d'un symbole choisi par l'utilisateur, et non dépendant de la suite bureautique choisie donc plus interopérable que le format XLS par exemple

En ce qui concerne la numérisation des documents 2D, celle-ci est faite par l'équipe de conservation du musée comme suit :

1. La référence du document est identifiée par les historiens et conservateurs à l'étape de constitution du corpus
2. Cette référence est transmise au service conservation, et plus particulièrement à la régie des œuvres
3. Si le document est présent dans la photothèque, le fichier est alors identifié et la procédure s'arrête
4. Sinon, le document est sorti des archives pour être numérisé par photographie ou à l'aide d'un scanner
5. Le fichier créé est alors intégré dans le système de gestion des collections et dans la photothèque du musée

Pour les documents faisant partie d'institutions externes telles que les archives, deux solutions sont possibles :

- Un contrat est passé entre le musée et l'archive pour définir les conditions d'utilisation de l'image. Le service des archives se charge alors de fournir un fichier adéquat au musée
- Dans l'idéal, les archives sont d'ores et déjà numérisées⁷ et accessibles au moyen d'outils automatisés tels que des APIs, ou des protocoles de moissonnage comme l'OAI-PMH⁸ (Lagoze *et al.*, 2002). De cette manière, il suffit alors de récupérer l'identifiant unique pointant vers la ressource plutôt que d'en copier le contenu.

En ce qui concerne la numérisation des objets 3D, le choix de la méthode et des outils dépend de la nature de l'objet (forme, matériau, taille, etc), des compétences disponibles et de la finalité. À titre d'exemple, voici les deux numérisations différentes réalisées dans le cadre du projet de la maquette du port :

- Une numérisation 3D, au moyen de scanners à main⁹, réalisée par une équipe d'ingénieurs et de chercheurs de l'École Centrale de Nantes. Ce travail a nécessité 2 semaines de travail manuel, suivi de plusieurs hommes-mois de travail de post-traitement du nuage de points généré.
- Une numérisation 2D, réalisée par un prestataire extérieur, par technique de photogrammétrie et d'« image stacking ». Un système de prise de vue semi-automatisé a ainsi permis de reconstituer deux images haute définition (16000 pixels de large) de la maquette, l'une en vue de dessus, et l'autre en vue à 45° proposée (cf. figure 4.5a). Cette numérisation était nécessaire pour la réalisation de l'interface graphique du dispositif muséographique.

La numérisation 3D est une étape courante pour la valorisation des objets patrimoniaux, notamment en archéologie. Dans le cas de la maquette du port, nous obtenons ainsi un nuage de points conséquent : près de 100 millions de points. Un travail de traitement du nuage de points est indispensable pour vérifier la cohérence de la topologie (trous, parties manquantes, assemblage de fichiers de session différents, etc.), bien que chaque modification entraîne une augmentation de l'erreur entre l'artefact virtuel final et l'objet original. Un compromis est donc à faire entre utilisabilité de ce modèle 3D généré et rigueur scientifique.

Cette étape de post-traitement a été faite semi-automatiquement à l'aide du logiciel Geomagic. Les recherches actuelles portent sur l'automatisation de ce type de traitement en combinaison avec des bases de connaissances.

Une fois le modèle 3D virtuel créé, celui-ci peut-être utilisé à des fins diverses :

- La génération de mondes virtuels, permettant une expérience immersive dans la ville d'époque

⁷En France, le ministère de la culture et de la communication a créé un plan national de numérisation du patrimoine culturel et lance chaque année un appel à projets de numérisation <http://www.culturecommunication.gouv.fr/Politiques-ministerielles/Recherche-Enseignement-superieur-Technologies/Innovation-numerique/>

⁸ Open Archives Initiative Protocol for Metadata Harvesting (OAI-PMH) est un protocole informatique basé sur le protocole HTTP pour moissonner les métadonnées des enregistrements d'archives. OAI-PMH est par exemple compatible avec des données publiées selon le format Dublin Core.

⁹Modèle HandyScan 3D de la marque Creaform

- L'aide à la géo-localisation des éléments de la maquette. Cette étape est critique car la précision de réalisation de la maquette doit être connue. Dans le cas de la maquette du port, un recalage de l'empreinte géographique de la maquette avec un système de référence géographique n'était pas possible automatiquement.
- La mise en relation des informations sémantiques avec des données géométriques et/ou géographiques. Il est possible d'automatiser une partie de ce travail, notamment par la reconnaissance automatique de formes dans le modèle 3D (Laroche *et al.*, 2012; Chevrier *et al.*, 2010). Les recherches en ingénierie mécanique peuvent apporter des éléments intéressants pour l'automatisation de cette étape.
- La liaison entre le système de gestion des données historiques et l'objet muséal. Le modèle 3D sert alors de repère de référence pour l'interaction homme-machine.

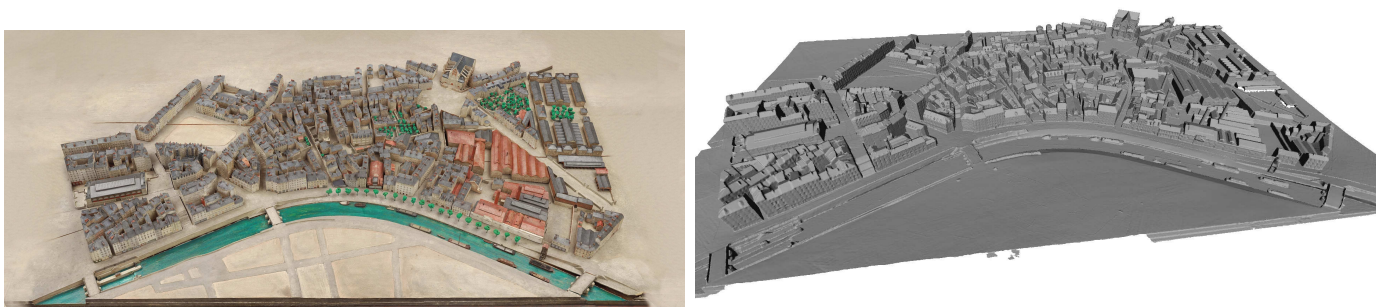


Figure 4.5 – La maquette du quartier Saint-Similien numérisé : (a) en 2D par photo-stacking (b) en 3D

Nous verrons comment ces différentes ressources sont manipulées et traitées grâce à plusieurs interfaces d'accès et de gestion.

4.4.3 Modélisation

Une fois le corpus de documents historiques constitué, nous avons conçu un modèle de données adapté aux besoins du projet et conformément au méta-modèle proposé au chapitre 3 (cf. figure 4.6).

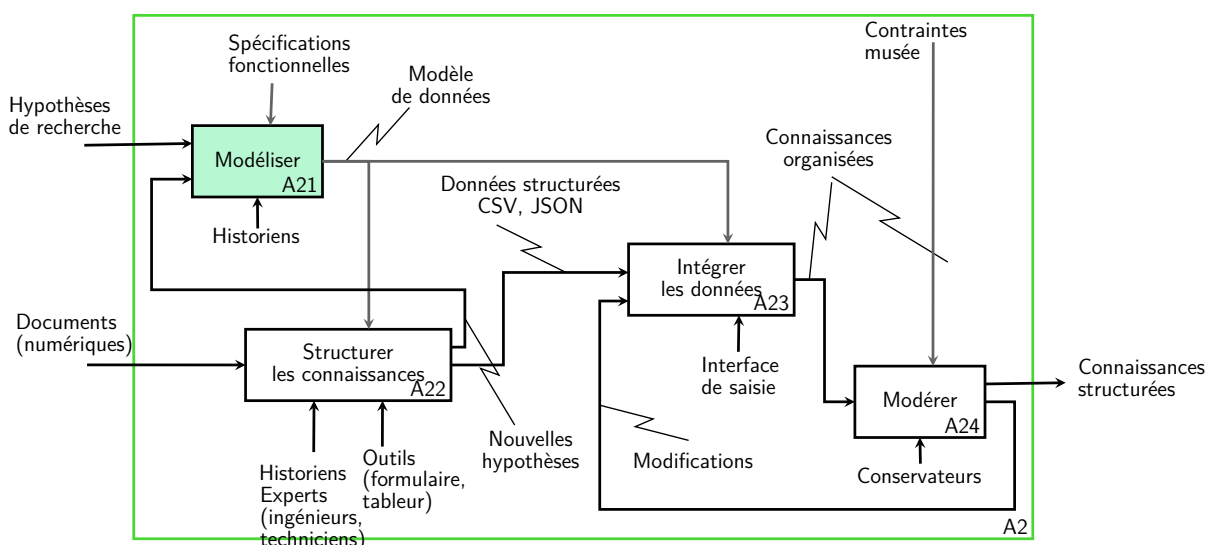


Figure 4.6 – Extrait de la figure 3.13 relatif au processus illustré dans cette section

Le modèle conceptuel choisi est détaillé figure 4.7 et implémenté à l'aide du SGBD Postgres¹⁰. Seule la gestion des relations au sens où nous l'entendons dans le cadre de notre méthodologie est délicate à traiter avec un SGBD relationnel : les systèmes relationnels reposent justement sur des relations entre tables à partir d'un système de clés. Dans notre cas, nous avons dû créer une table « relation » générique pour répondre à nos besoins. Ce modèle est en grande partie conforme au méta-modèle proposé au chapitre 3. Cependant, pour des raisons pratiques (le choix du modèle conceptuel a été arrêté au début de la thèse) et techniques (notamment liées au manque d'interopérabilité avec le système de gestion des collections du musée), il existe des différences entre le modèle théorique vers lequel nous essayons de tendre et le modèle effectivement implémenté.

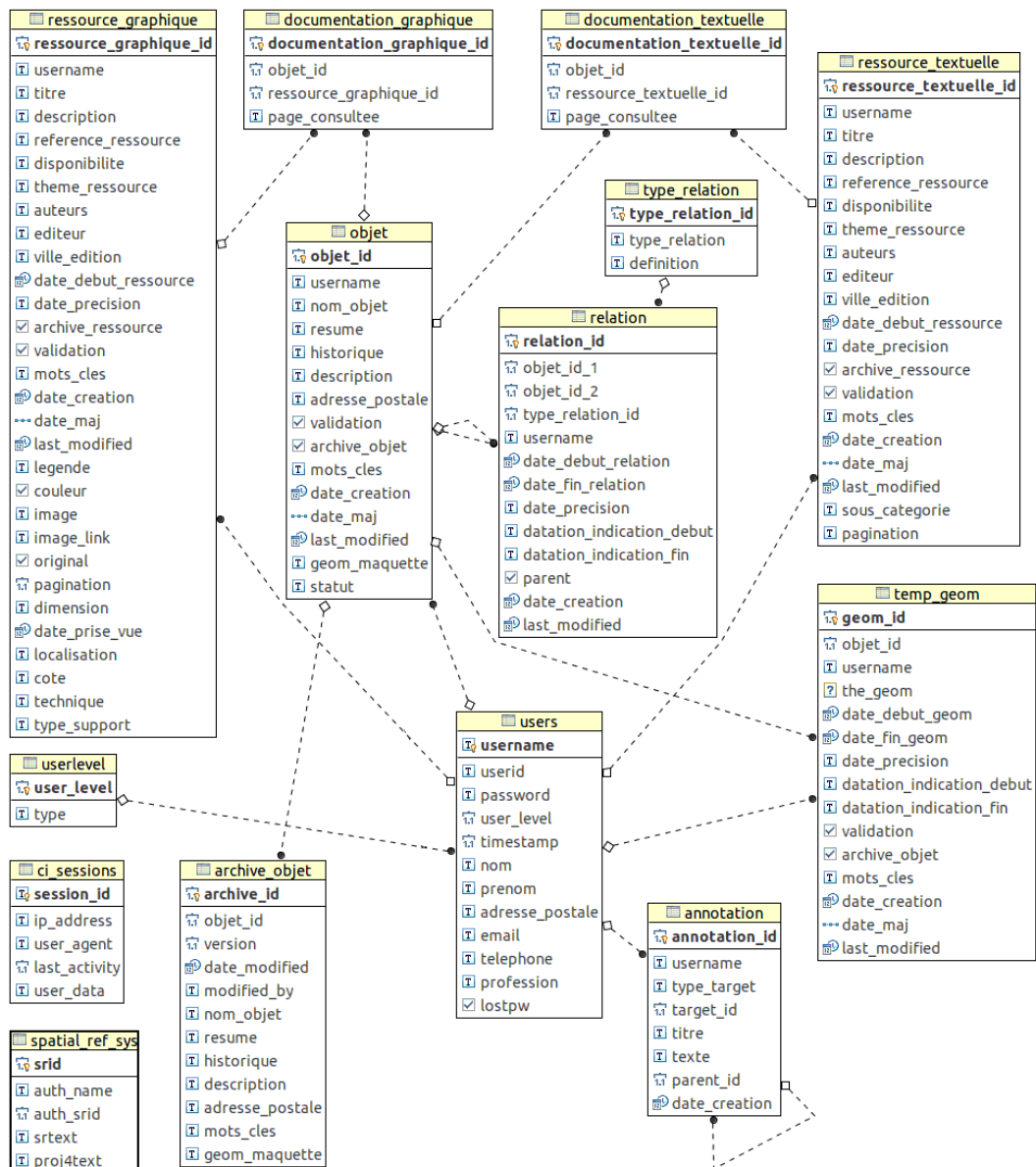


Figure 4.7 – Schéma physique de la base de données implémentée pour la gestion des données du projet Nantes1900

Le choix de l'outil a reposé sur les compétences disponibles au moment de la mise en œuvre du projet, et sur des critères d'interopérabilité (avec les technologies web notamment) et de facilité de gestion. En effet, Postgres est un système très répandu pour la gestion de bases de données relationnelles, avec un

¹⁰Le code SQL permettant la création du schéma de la base de données est accessible sur Github : https://github.com/Nantes1900/database/blob/master/FichierCompleet_BaseDonnees.sql

module SIG également répandu. Par ailleurs, sa mise en œuvre est relativement simple, de même que le langage de requêtage SQL. Cela permet de développer rapidement des modules d'extraction des données pour les différentes interfaces.

Chaque entité (fiche connaissance codée « objet », ressources texte ou graphique, relation, données géographiques) est stocké dans une table dédiée. Chaque table possède des champs stockant les méta-données nécessaires à la description des différentes entités. La plupart des méta-données, notamment pour les sources, sont basées sur celles du système de gestion des collections du musée.

Afin d'illustrer la structure de données choisie pour modéliser les informations historiques, nous proposons un exemple d'instanciation comme le montre la figure 4.8.

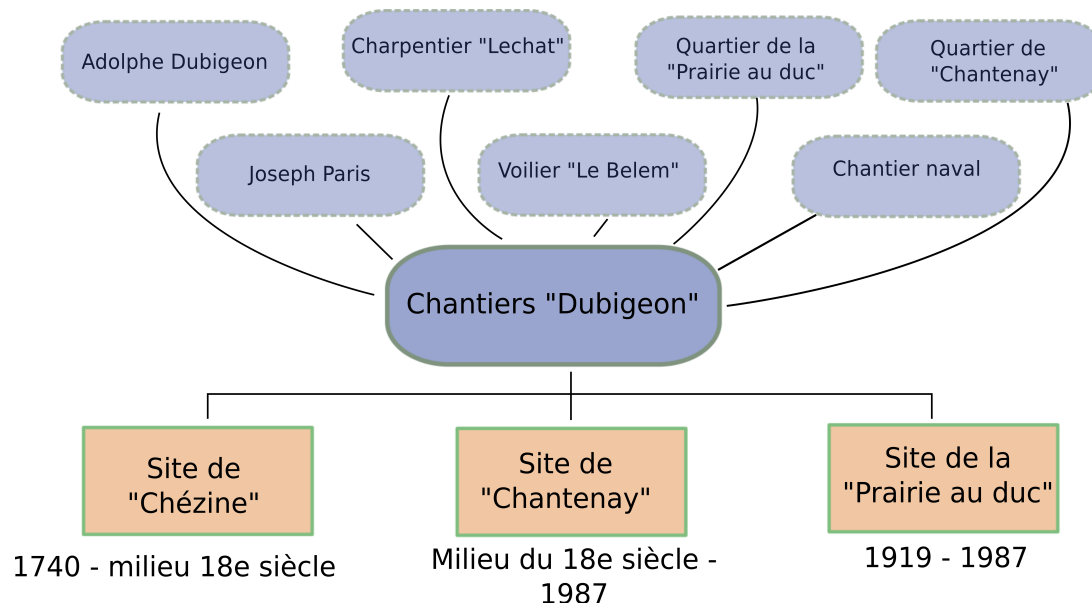


Figure 4.8 – Exemple d'instanciation du modèle avec le cas des chantiers Dubigeon. Les concepts sémantiques ou sujets d'étude correspondant à des fiches sont en bleu, et les données géographiques sont en orange

Pour les besoins de conception du dispositif muséographique final, nous ajoutons des méta-données supplémentaires comme un texte descriptif utilisé pour la médiation auprès du public (la taille des textes utilisés pour les explications au sein du musée est limitée à environ 200 caractères), des mots-clés utilisés pour la création du réseau sémantique, ainsi que les coordonnées des éléments dans le système de coordonnées de la maquette.

La classe principale « objet » contient les métadonnées de base comme le titre, la description, l'adresse d'époque éventuelle, and les mots-clés. Cette classe pourrait être étendue avec des modèles de référence pour l'interopérabilité avec d'autres systèmes. Des modèles tels que le CIDOC-CRM pourrait alors spécifier la typologie des objets concernés de manière plus fine. La classe « Relation » permet de modéliser les liens entre les fiches. Des métadonnées supplémentaires peuvent être ajoutées pour spécifier les propriétés de la relation : justification, informations de durée, catégorie, etc.

En ce qui concerne les ressources, si les méta-données sont celles utilisées par le système de gestion du musée, il est possible d'aligner le modèle avec d'autres modèles de référence comme le Dublin Core par exemple. Cette éventualité n'a pas été implémentée.

Les données géographiques ont une propriété temporelle et sont gérées dans une classe à part dont certains attributs proviennent du système d'information géographique PostGIS. Cela permet au système d'être extensible même si les possibilités de modélisation spatio-temporelles ne sont pas aussi fines que dans des modèles comme MADS¹¹. En effet, si la majorité des informations stockées dans le système

¹¹Le modèle MADS, *Modeling Application Data with Spatio-temporal features*, permet de représenter des données urbaines multi-échelles et multi-représentations (Parent et al., 1997).

sont datées entre 1880 et 1930 environ, il est possible d'élargir cet intervalle, pour des monographies plus complètes dans le temps par exemple. Chaque élément dont le positionnement géographique a un sens (bâtiment, entreprise) peut se voir attribuer plusieurs emplacements spatiaux dans le temps.

Remarque : Des tests d'implémentation du modèle dans Neo4j ont été menés à titre d'expérimentation pour l'étude du réseau sémantique formé par les fiches. Cependant, le module SIG de Neo4j n'étant pas aussi abouti que PostGIS lors de la réalisation de ce travail, l'utilisation de ce SGBD orienté graphe n'a pas été étudiée outre mesure.

4.4.4 Création des fiches connaissance

À partir du corpus de documents constitué, les historiens ont rédigé des fiches (cf. figure 4.9) sur des éléments d'intérêt (classe **objet**) liés à la maquette du port de Nantes. Ces éléments sont des bâtiments comme des chantiers navals ou le pont transbordeur, des entreprises comme « les ACB, Ateliers et Chantiers de Bretagne », des personnes (dirigeants d'entreprise, architectes) ou des thématiques (« La construction navale au début du XX^e siècle »).

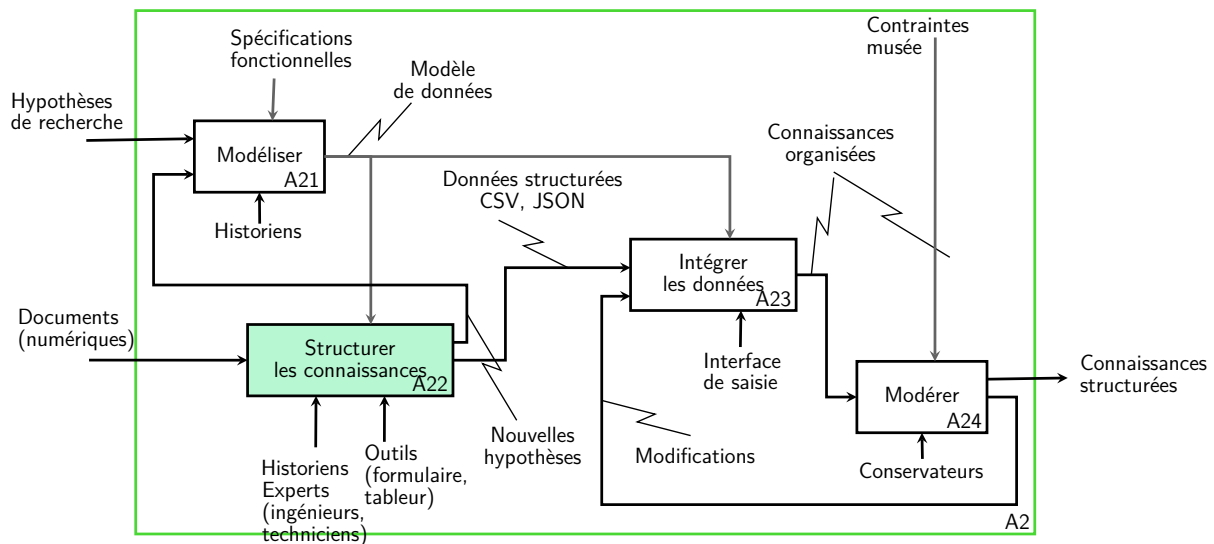


Figure 4.9 – Extrait de la figure 3.13 relatif au processus illustré dans cette section

Chacun de ces éléments est alors documenté au moyen des références bibliographiques identifiées, et des documents graphiques, peintures, cartes postales, estampes, etc.

Plus de 500 fiches ont ainsi été rédigées dans le cas du port de Nantes, mais seulement 440 ont été validées par les services du musée (pour mise à disposition du public sur les interfaces de visualisation) au moment de la rédaction de ce manuscrit. À cette étape du processus, ces fiches sont stockées au moyen d'un tableur au format CSV.

Chaque fiche est constituée des éléments suivants :

- Un identifiant unique créé automatiquement par le SGBD (système de gestion de base de données)
- Un titre
- Une description utilisée pour la diffusion sur le dispositif muséographique et validée par les équipes de conservation et de médiation du musée
- Un texte long, fruit de l'analyse de l'historien, contenant l'ensemble de ses connaissances
- Des caractéristiques spatiales et temporelles, gérées par un module SIG dédié. Il est par exemple possible de spécifier plusieurs emplacements sur des intervalles de temps différents. La précision de l'intervalle temporel peut également être spécifié, mais pas la précision spatiale.
- Des paradata : identité de l'auteur, version de la fiche, statut (ébauche, à revoir, validée)

- Un ensemble de liens avec d'autres fiches (identifiées manuellement dans notre cas mais pouvant être identifiées semi-automatiquement)

Pour garantir un système conforme aux exigences du travail scientifique des historiens, le système permet à différents utilisateurs de contribuer à l'ajout ou la modification d'informations. Un système simple de versionnement des fiches est donc nécessaire pour garder une traçabilité des informations gérées. Chaque fiche est donc versionnée¹² : toute modification d'une partie entraîne une sauvegarde de l'état de la fiche avec l'identité de l'utilisateur, la date et l'heure de modification, ainsi qu'un message d'explication.

À terme, une analyse automatique de la différence entre deux fiches connaissances F_i et F_{i+1} permettrait de créer une nouvelle fiche connaissance explicitant le passage de i à $i+1$, et représentant l'évolution de la connaissance sur le sujet d'étude de la fiche F .

4.4.5 Interface de gestion

Afin d'intégrer les différentes données, une interface de gestion a été conçue pour l'administration du contenu. Cette interface propose différents accès pour différents profils d'utilisateurs :

- Le profil de visiteur a la possibilité de consulter et d'exploiter les informations présentes dans le système. Il peut également proposer des contenus dont il est détenteur pour l'enrichissement du système. C'est donc un nouveau profil que nous pouvons nommer visiteur-acteur. La proposition de nouveaux contenus entraîne une étape de validation avant intégration.
- Le profil de chercheur a accès à la création de fiches connaissance, à l'ajout de contenu et peut proposer des modifications. Il peut également interagir avec les autres chercheurs au moyen d'annotations.
- Le profil de modérateur est relatif aux professionnels du musée. Il a la charge de la validation des contenus, et est informé de toute proposition d'ajout, de modification de la part des utilisateurs.
- Enfin, le profil administrateur n'a qu'un rôle purement technique et garantit le bon fonctionnement de la plateforme ainsi que l'attribution des profils.

Techniquement, l'interface est développée avec des technologies web couramment utilisées :

- PHP¹³
- HTML¹⁴
- Javascript¹⁵

Le framework choisi pour développer l'interface est CodeIgniter <https://ellislab.com/codeigniter>. Ce framework, sous licence Apache/BSD permet de fournir des briques logicielles pré-programmées pour la réalisation des différentes fonctionnalités : connexion à la base de données, gestion des sessions utilisateurs, création et validation des formulaires, etc. En terme de conception logicielle, le patron utilisé est MVC, modèle-vue-contrôleur¹⁶.

Le système de gestion de base de données choisi est Postgres (version 9.1) associé au cartouche SIG PostGIS. Postgres permet de gérer des bases de données relationnelles.

¹²Le versionnement s'effectue directement au sein du système de gestion de base de données, grâce à une table dédiée à l'archivage et un déclencheur s'activant à chaque modification.

¹³Hypertext Preprocessor est un langage de programmation libre utilisé pour le développement d'applications web

¹⁴HyperText Markup Language est un langage permettant de représenter les données d'une page web sous forme de balises. Son utilisation combinée à des feuilles de style ou Cascading Style Sheet (CSS) permet de séparer le fond de la forme des documents

¹⁵Javascript est un langage de programmation permettant d'intégrer un script, ou programme informatique, à l'intérieur d'une page web. Ceci permet d'effectuer des manipulations sur le fond ou la forme du document, directement par le biais du navigateur web, sans effectuer de requête au serveur de données.

¹⁶Le patron MVC permet de séparer les différents composants d'une architecture logicielle. La partie Modèle gère la connexion à la base de données et la nature des entités manipulées, la partie Vue gère les pages web et le Contrôleur gère la communication et le traitement des données.

L'interface propose différentes fonctionnalités selon les droits de l'utilisateur :

- L'accès aux données par simple visualisation. L'utilisateur peut alors accéder aux fiches préalablement validées par les modérateurs. Il peut également consulter les différents documents graphiques et accéder aux informations par leur position géographique.
- L'ajout de sources avec les fiches existantes auxquelles elle peut être rattachée. Ces sources peuvent être des documents écrits sous forme de référence bibliographique ou bien des documents graphiques tels que des photographies, des cartes postales ou tout autre document numérisé
- L'ajout de fiches, à l'unité ou par lot. Le chercheur peut ainsi créer une nouvelle fiche liée à un sujet, soit nouveau, soit relatif à un élément déjà présent dans la base de données. Cette intégration peut se faire par une carte géographique, par un positionnement sur une représentation de la maquette ou simplement au moyen d'un formulaire.
- La modification du contenu peut être effectuée par les chercheurs et les modérateurs. Un système d'annotations permet de débattre de manière collaborative sans modifier le contenu. Chaque modification d'une fiche entraîne l'archivage de l'ancienne version.
- La validation du contenu ne peut se faire que par les modérateurs. Chaque fiche nouvellement créée entre dans un cycle de validation collaboratif. L'attribut « description », est validé par l'équipe de médiation du musée tandis que la fiche dans sa globalité est étudiée par l'équipe de conservation. Le processus est itératif, la fiche étant d'abord visée par le service conservation, puis par le service des publics une fois la fiche validée, puis par le service des éditions pour relecture finale avant intégration de la fiche dans les interfaces connectées à la base de données. Un statut intermédiaire peut également être appliqué à la fiche si cela s'avère nécessaire.
- Enfin, la gestion des utilisateurs revient à la charge des administrateurs.



Figure 4.10 – Interface principale une fois l'utilisateur authentifié. Un menu propose les différentes actions possibles selon le profil et les droits de l'utilisateur.

Table 4.3 – Tableau récapitulatif des actions possibles en fonction du profil de l'utilisateur

	Non inscrit	Visiteur	Chercheur	Modérateur	Administrateur
Consultation	✓	✓	✓	✓	✓
Ajout sources	X	✓	✓	✓	✓
Création de fiches	X	X	✓	✓	✓
Modification de fiches	X	X	✓	✓	✓
Validation (ajouts et modifications)	X	X	X	✓	✓
Gestion utilisateurs	X	X	X	X	✓

Visualisation des données

Grâce à l'interface, plusieurs modes de consultation sont possibles :

- Par fiche, au moyen de différents filtres ou de champs de recherche utilisant l'indexation de la base de données. L'utilisateur a alors accès à une fiche, aux fiches qui lui sont liées, aux références bibliographiques et documents ayant servi à la documentation.
- Par la carte comme le montre la figure 4.11, pour les éléments dont la position géographique est connue sur la maquette ou sur une carte de la ville actuelle. L'utilisateur est alors renvoyé, après sélection, à la fiche relative au polygone ou au marqueur présent sur la carte. Cette fonctionnalité devrait pouvoir être significativement améliorée, car il est important d'ajouter certaines fonctions présentes dans les logiciels SIG classiques : distinguer différentes couches temporelles pour constater l'évolution du territoire par exemple, ou encore pouvoir ajouter des couches raster (cartes anciennes géo-référencées par exemple) pour géo-référencer dans le temps les éléments quand cela est possible. Les fonctionnalités de base implémentées dans l'interface reposent sur une bibliothèque Javascript spécifique : Leaflet.js <http://leafletjs.com/>. L'ajout de nouvelles fonctionnalités dans une interface web n'est pas une tâche aisée ni forcément adaptée.
- Par document historique, si cela est nécessaire.

Il est également possible d'intégrer de nouveaux modes de visualisation, exploitant la structure de données en réseau, au moyen de technologies web adaptées, principalement des bibliothèques Javascript : d3js d3js.org, Raphael.js [raphaeljs.com](http://dmitrybaranovskiy.github.io/raphael/), Sigma.js [sigmajs.org](http://dmitrybaranovskiy.github.io/sigma.js/).

Intégration des données

Conformément au processus décrit au chapitre 3, il s'agit désormais d'intégrer les différentes informations constituées lors de l'activité A22 (cf. figure 4.12).

L'utilisateur peut ajouter au système 3 types d'informations :

- Des informations sémantiques sous la forme de nouvelles fiches, liées à des sujets d'intérêt historique, dans lesquelles l'auteur intègre ses connaissances sur le sujet. Pour ce faire, l'utilisateur a trois possibilités :

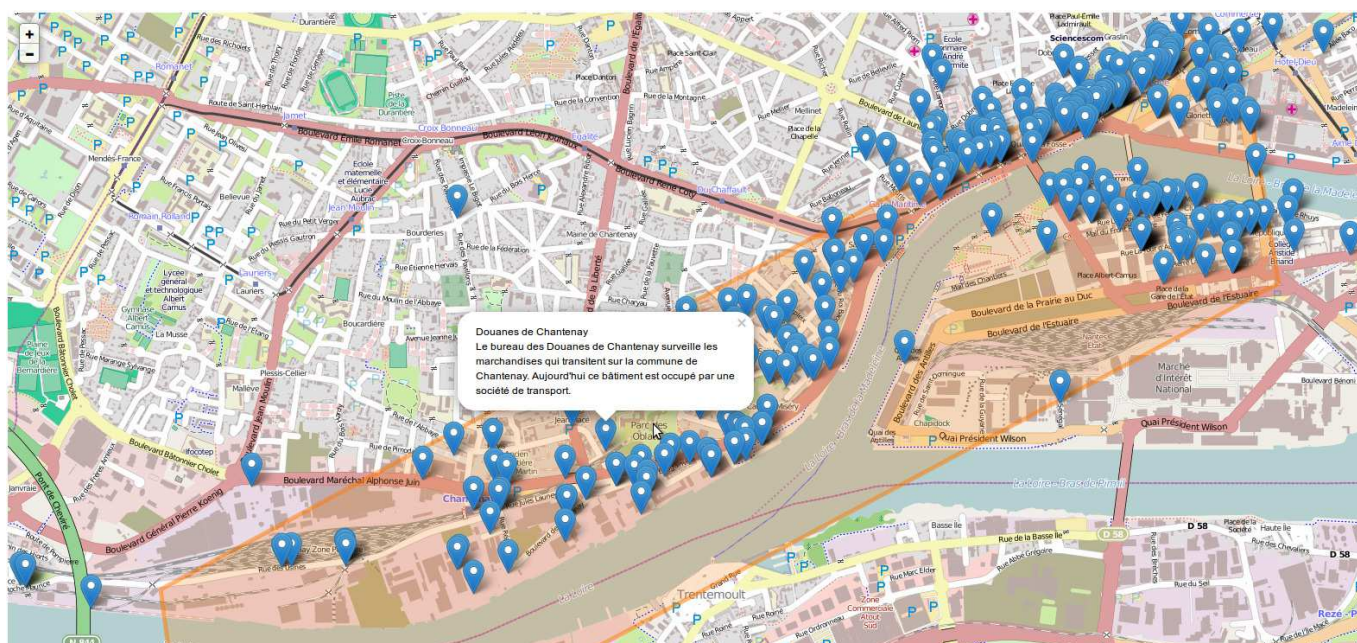


Figure 4.11 – Répartition des éléments d'intérêt présents dans le système et étant géo-localisés. Les marqueurs représentent une indication ponctuelle approximative de l'emplacement des items dans la base de données. La figure montre également l'estimation de l'empreinte géographique de la maquette du port de Nantes

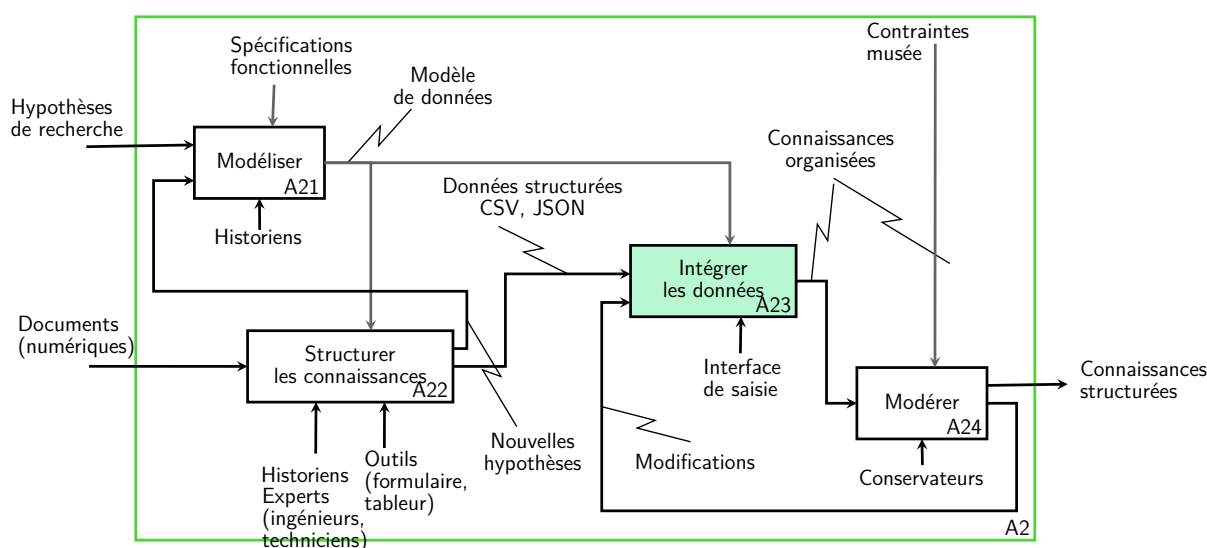


Figure 4.12 – Extrait de la figure 3.13 relatif au processus illustré dans cette section

1. Créer une fiche par l'intermédiaire d'un formulaire standard servant à renseigner les différentes informations nécessaires à l'intégration dans le système : titre, description, historique, mots-clés
2. Intégrer un ensemble de fiches directement à partir d'un tableau préalablement téléchargé et conforme à la structure de la base de données
3. Positionner un élément sur la carte et créer une fiche sur cet élément

Il est également possible d'associer plusieurs fiches ensemble, constituant ainsi un réseau tel que celui de la figure 4.18.

- Des références relatives à des sources historiques et servant à documenter une ou plusieurs fiches connaissance.
- Des données géographiques, soit à partir d'une carte de la ville (cf. figure 4.13) (provenant des

serveurs d'OpenStreetMap¹⁷) soit à partir d'une orthophoto de la maquette (cf. figure 4.14).



Figure 4.13 – Interface dédiée à la géolocalisation des éléments de la maquette. L'utilisateur peut créer une nouvelle fiche à partir de la carte ou référencer un élément existant sur la carte.

Dans le cadre du projet Nantes1900, deux types d'informations géographiques sont nécessaires : la localisation sur la maquette, et la localisation dans un système de référence (WGS84, utilisé par le système GPS). En effet, la maquette n'a pu à l'heure actuelle être recalée dans un système géodésique de référence¹⁸, par conséquent, il a fallu stocker ces deux informations différentes.

Pour la localisation des éléments sur la maquette, tâche nécessaire pour le bon fonctionnement de l'interface muséographique, nous avons utilisé un logiciel de SIG : QGIS¹⁹. La procédure est la suivante :

1. Ajouter une couche raster, basée sur l'orthophoto de la maquette, qui servira de système de référence : la coordonnée (0,0) est positionnée arbitrairement au pixel situé à l'extrémité en bas à gauche de la photo, et la coordonnée (130,70) (ces valeurs correspondent aux dimensions de la maquette) est associée au pixel en haut à droite.
2. On crée une nouvelle couche vectorielle (shapefile) qui servira à tracer les zones géographiques relatives aux éléments de la base de données
3. Pour chaque élément de la base de données devant être positionné sur la maquette, on utilise la fonction de création d'un polygone du logiciel de SIG. Le détournage de la zone se fait de manière approximative en se basant sur les sources historiques. Le résultat est présenté figure 4.14.
4. La couche vectorielle est sauvegardé au format WKT (Well-Known Text)²⁰ et chaque polygone est ainsi stocké sous la forme $POLYGON((x_1y_1, \dots, x_iy_i, \dots, x_ny_n))$ et associé à la fiche de l'élément dans la base de données.

¹⁷OpenStreetMap www.openstreetmap.org est un projet ayant pour objectif de créer une base de données géographiques libre du monde. Les données pouvant être ré-utilisées selon les termes de la licence OdBL (Open Database License).

¹⁸À l'époque de la conception du plan-relief du port de Nantes, le relevé géographique et géométrique des éléments bâtis se fait manuellement par observation sur place. Les notes manuscrites sont ensuite transmises aux artisans travaillant pour le maquettiste. Cette chaîne de traitement génère donc une perte d'informations impossible à quantifier et à distinguer des erreurs de modélisation relatives à la transformations naturelle du territoire ainsi que des matériaux (bois et carton) constituant la maquette.

¹⁹QGIS <http://www.qgis.org/fr/site/> est un logiciel libre sous licence GPL servant à la création de SIG.

²⁰WKT est un format en mode texte pour représenter des objets vectoriels dans un SIG

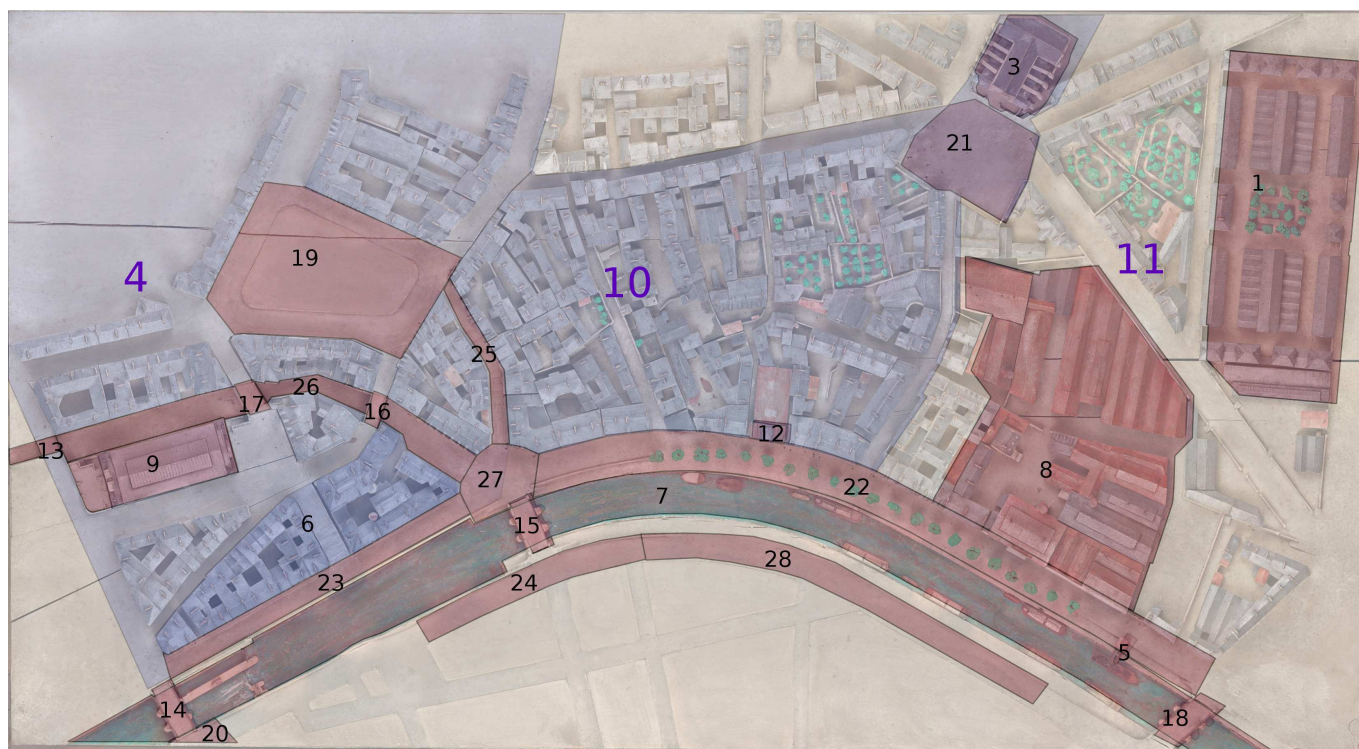


Figure 4.14 – Positionnement des éléments sur l'orthophoto issue de la numérisation par photogrammétrie de la maquette du quartier Saint-Similien. Cette étape a été réalisée manuellement à l'aide du logiciel libre QGIS.

Modération du système

La modération du contenu est une fonctionnalité critique pour le bon fonctionnement du système (cf. figure 4.15). En effet, le dispositif muséographique développée est connecté au contenu présent dans le système. Il est donc important pour les équipes du musée de valider tant le fond que la forme des contenus proposés au public. En effet, le musée se doit d'assurer sa mission scientifique première.

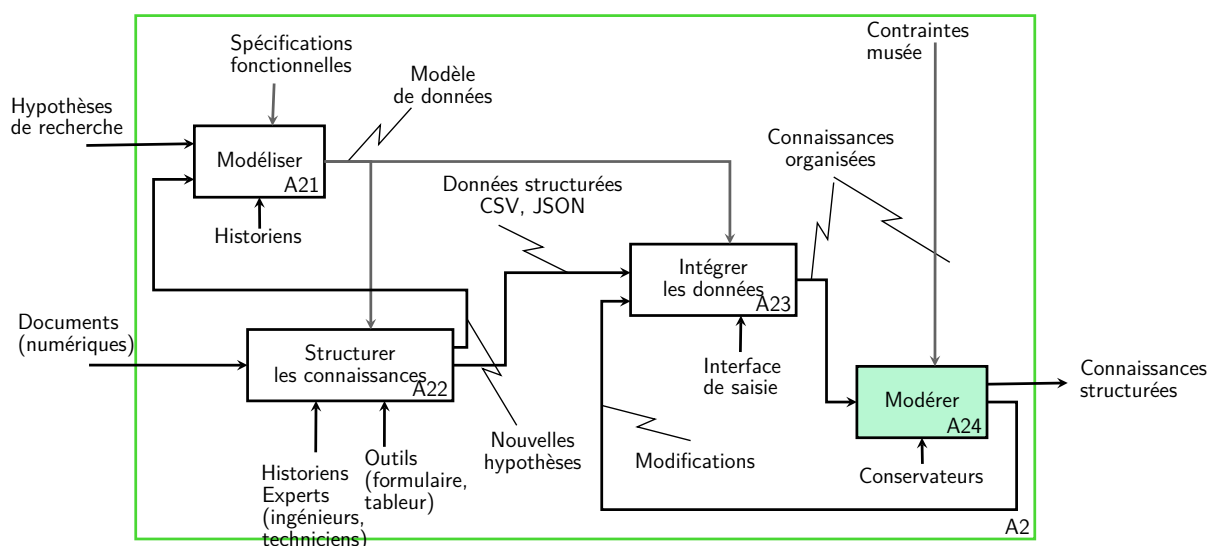


Figure 4.15 – Extrait de la figure 3.13 relatif au processus illustré dans cette section

Le rôle de modérateur est assuré par le service de la conservation du musée pour la vérification scientifique du contenu, le service des publics pour la rédaction et la validation du texte de médiation qui sera affiché sur l'interface muséographique et le service des éditions pour la vérification finale de la forme.

Lorsque le modérateur s'authentifie dans le système, il a accès à toutes les fiches modifiées ou ajoutées

au système comme le montre la figure 4.16. De même que pour la consultation normale, différents filtres sont proposés notamment pour accéder directement aux fiches en attente de validation selon le service auquel appartient l'utilisateur courant. Les nouvelles fiches entrent dans un processus de validation assisté par l'outil proposé :

1. La fiche est d'abord transmise au service de la conservation pour itération avec les historiens et validation scientifique du contenu. Le modérateur peut alors attribuer un statut à la fiche, dépendant de sa qualité rédactionnelle ou scientifique.
2. Une fois validée par le service de la conservation, elle est transmise au service des publics ou elle est relue par les médiateurs du musée qui vont corriger ou éventuellement rédiger le texte descriptif qui servira pour toutes les interfaces de médiation du musée.
3. Lorsque l'étape 2 est terminée, le service des éditions se charge d'effectuer la relecture finale avant validation
4. La fiche validée devient alors accessible librement sur l'interface web par tous les éventuels visiteurs, ainsi qu'ajoutée à toutes les interfaces connectées au système

Pour faciliter ce processus de validation collaboratif et itératif, les modérateurs ont la possibilité de verrouiller une fiche pour simplifier la tâche de vérification aux différents acteurs. Seul le modérateur ayant verrouillé la fiche a alors la possibilité d'apporter des modifications en attendant de la valider.

Page :

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38

Objet	Créateur	Validation	Statut	Validation Service Conservation	Validation Service des publics	Validation Service des éditions	Modifier et Valider	Bloqué par	Supprimer
Amiaud Henri, usine d'engrais	stagiaire_cfv	Non valide		Non valide	Non valide	Non valide	Éditer	Bloquer	Effacer
Amiaud Paul, usine d'engrais	stagiaire_cfv	Non valide		Non valide	Non valide	Non valide	Éditer	Bloquer	Effacer
Amieux frères, M. Amieux et Cie	mediation	Non valide		Valide	Valide	Non valide	Éditer	Bloquer	Effacer
Amieux frères, M. Amieux et Cie, bâtiments annexes	mediation	Non valide		Valide	Valide	Non valide	Éditer	Bloquer	Effacer
Amieux Maurice	mediation	Non valide		Valide	Valide	Non valide	Éditer	Bloquer	Effacer
Ardouin, matériaux de construction	mediation	Non valide		Valide	Valide	Non valide	Éditer	Bloquer	Effacer
A.Solignac et P.Charbonnier, Industrie chimique	abouille	Non valide	a_revoir	Non valide	Non valide	Non valide	Éditer	Bloquer	Effacer
Ateliers et Chantiers de Bretagne, ACB	aurelie.dedecker	Non valide		Valide	Non valide	Non valide	Éditer	Bloquer	Effacer

Figure 4.16 – Interface dédiée à la gestion des fiches par les modérateurs. Le système propose l'ensemble des fiches et un filtre pour effectuer un tri : par titre, par statut, etc.

Lorsque le modérateur choisit de modifier ou valider une fiche particulière, il accède à l'interface telle qu'illustré figure 4.17. Il est alors possible d'effectuer plusieurs actions :

- Apporter des modifications aux différents champs d'une fiche au moyen d'un formulaire simple
- Créer une annotation liée à la fiche, à destination des autres chercheurs et modérateurs ou répondre à une annotation existante. Ce système d'annotations est très important pour garantir la possibilité de débattre entre experts sur certaines informations.
- Valider les modifications apportées, en ayant éventuellement attribuer préalablement un statut particulier à la fiche. La liste des statuts peut-être modifiée selon l'évolution des besoins. Au moment de la rédaction de ce manuscrit, deux statuts ont été choisis au sein du musée : « ébauche », signifiant qu'un travail important de recherche scientifique est à prévoir et « à revoir » signifiant que des erreurs ou des doutes subsistent sur la fiche empêchant sa validation.

Modification de l'objet : Brunellière Ch. et F. frères, armateur

Objets en relation

Ressources en relation

- Capitaines d'industrie à Nantes au XIXe siècle

Incomplet

aboutille: Manque ref biblio

Répondre

Le champ Nom_objet est obligatoire.

Modification de l'objet : Brunellière Ch. et F. frères, armateur

Imprimer la fiche

Créateur

Nom

aboutille

Brunellière Ch. et F. frères, armateur

Résumé

Entre 1899 et 1913 au moins, le 5 quai Ile Gloriette accueille la maison d'armement Brunellière Ch. et F. Frères. Cette dernière est dissoute en 1915. Un immeuble résidentiel a aujourd'hui remplacé cette entreprise.

Historique

La maison d'armement Brunellière Ch. Et F. frères, située au 5 quai Ile Gloriette, est mentionnée par les Annaires de Loire-Inférieure pour les années 1899 à 1913. Le siège social de l'entreprise est quant à lui installé au 83 quai de la Fosse. Les deux frères se retirent des affaires en 1915. Aujourd'hui, des logements ont succédé à l'entreprise.

Adresse Postale

5 quai Ile Gloriette, Ile Gloriette, Nantes, sièg

Mots-clés

activites_industrielles_portuaires_et_maritimes, armateur, Brunelliere_Charles_et_Ferdinand_freres, Brunelliere_Charles, Brunelliere_Ferdinand, Quai_Ile_Gloriette, Allée_de_l_Ile_Gloriette,

☐ Validation Service Conservation

Statut de la fiche

Ébauche

Enregistrer les modifications

Nouvelle annotation

Figure 4.17 – Interface dédiée à la modification d'une fiche. Le modérateur a la possibilité de modifier les différents champs, de créer une annotation ou d'y répondre, de donner un statut à la fiche puis de valider les modifications selon le service auquel l'utilisateur appartient.

4.4.6 Synthèse sur l'intégration des données

Le processus *initial* d'intégration des données, dont les détails théoriques ont été décrits au chapitre 3 (cf. figure 4.12) s'est fait de la manière suivante :

1. Rédaction des fiches au format word. Le format utilisé a été choisi par souci de compatibilité avec la méthode de travail des historiens ayant travaillé sur le projet
2. L'intégralité des informations ont été structurées selon plusieurs fichiers afin d'anticiper le traitement automatique et l'intégration dans le système. En pratique, chaque type de données a été stocké dans un tableau formaté selon les attributs de la classe correspondante dans la base de données :
 - Fiches connaissances avec une colonne pour les différents attributs : titre, description, mots-clés, etc.
 - Documents historiques avec les méta-données nécessaires à leur identification. Un fichier est créé par type de document (référence bibliographique, document graphique, etc.)
 - Liste des documents historiques servant à documenter chacune des fiches créées

- Liste des relations pour chaque fiche. Cette liste est générée automatiquement par un script écrit en Python²¹ à partir de la liste des mots-clés de chaque fiche.

3. Chaque fichier stocké au format CSV est traité par l'interface web au moyen d'un script PHP.

Ce processus permet donc de passer des données brutes semi-structurées au système d'information de musée.

Interopérabilité avec le système de gestion des collections du musée pour la récupération des documents historiques graphiques

Le système de gestion des collections du musée repose sur un inventaire détaillé et exhaustif des objets contenus dans les collections. Ces objets sont décrits selon un ensemble de méta-données respectant la norme Spectrum et des termes de description (mots-clés) spécifiés dans un thésaurus interne. L'identifiant unique attribué à chacun des objets de collection s'appelle le numéro d'inventaire : il se compose d'une série de chiffres faisant mention de l'année d'intégration dans les collections, et de sa position dans la série d'objets inventoriés.

En ce qui concerne la photothèque du musée, système d'information dédié à l'archivage des objets (tableaux, estampes, gravures, cartes postales, photographies) numérisés, chaque cliché est un fichier au format TIFF contenant des méta-données IPTC et dont le nom de fichier correspond au numéro d'inventaire pour les clichés haute définition.

Par conséquent, afin d'automatiser la récupération des contenus identifiés comme pertinents pour la documentation du projet de la maquette du port, il a fallu mettre en place la procédure suivante :

Algorithme 1 : Script de récupération des fichiers de la photothèque à partir d'une liste pré-établie

Entrées : Fichier contenant pour chaque ligne i un document à récupérer avec le numéro d'inventaire NI et l'identifiant dans la base de données BI

Sorties : Ensemble de fichiers images

pour chaque document à récupérer i **faire**

 Récupération de la valeur NI ;

 Parcours des fichiers de la photothèque dont le nom est N ;

si $NI \neq N$ **alors**

 Continuer de parcourir la photothèque;

sinon

 Correspondance trouvée;

 Copie du fichier N en le renommant BI ;

fin

fin

Le script 1 a été codé en Python et exécuté sur le serveur de fichiers de la photothèque du musée.

En ce qui concerne les clichés en basse définition, le nom des fichiers de correspond pas au numéro d'inventaire de l'objet de collection. Dans ce cas, la procédure devient semi-automatique et nécessite d'utiliser le logiciel propriétaire de gestion des collections AdLib :

Étape 1 : Construire la requête dans AdLib visant à récupérer le numéro de cliché correspondant à un numéro d'inventaire

Étape 2 : Le logiciel ne pouvant exporter plus de 10 numéros, répéter la tâche consistant à exporter les numéros de clichés à partir d'une liste de 10 numéros d'inventaire

Étape 3 : Appliquer le script 1 en modifiant le numéro d'inventaire de référence NI par le numéro de cliché NC et parcourir la section du serveur contenant les clichés basse définition

²¹Python <http://www.python.org/> est un langage de programmation multi-plateforme sous licence libre

Réseau de données

À l'issue de l'intégration des données, nous obtenons un réseau multi-dimensionnel. La partie sémantique du réseau formé par la mise en relation des fiches connaissance est proposé en figure 4.18. On observe qu'à partir d'un ensemble K de 400 fiches environ et d'un nombre limité de mots-clés identifiés comme pertinents par les historiens pour chaque fiche, on crée un réseau sémantique de plus de 2300 nœuds. En effet, l'algorithme 2 permet de créer un nouveau nœud pour chaque mot-clé n'existant pas déjà en tant que nœud.

Algorithme 2 : Algorithme de création des liens à partir des mots-clés

Entrées : Fichier contenant pour chaque ligne une paire (identifiantFiche, [motclé₁... motclé_n])

Sorties : Graphe $G = (V, E)$

pour chaque fiche i **faire**

 Parcours de la liste des « mots-clés » de i ;

pour chaque mot-clé j **faire**

si $j \in V$ **alors**

$E \leftarrow (i, j)$;

sinon

$V \leftarrow j$;

$E \leftarrow (i, j)$;

fin

fin

fin

La création automatique de nouveaux nœuds permet d'identifier ensuite dans le réseau des éléments importants pour la compréhension d'une partie du graphe (contexte d'un élément en particulier, ou « schème »). Cela induit un effet très important pour le travail de l'historien et la construction des connaissances : *un nœud très connecté peut devenir une indication sur l'importance des informations qui y sont liées et ainsi justifier une étude approfondie de ce sujet.*

Par ailleurs, cette représentation sous forme de réseau permet également d'observer des sous-graphes pouvant être de nouveaux schèmes au sens du DHRM dans (Laroche, 2007).

Nous apportons ici un élément important pour la validation de l'hypothèse 1-b — La méthodologie de patrimonialisation d'un objet muséographique permettrait d'assister les experts conservateurs et historiens dans le processus de conservation et de création des connaissances — présentée au chapitre 1. En effet, à partir d'un ensemble de connaissances provenant de différents acteurs, la mise en réseau des données donne ici des pistes d'exploration potentiellement inconnues pour les historiens d'après leur ensemble de connaissance initial.

Remarque : Nous proposons de faire une comparaison conceptuelle avec la théorie de l'innovation C-K²² puisque le système va élargir l'espace des connaissances en combinant les espaces de connaissances des différents contributeurs et potentiellement faire émerger de nouveaux concepts ou pistes à explorer.

Remarque 2 : À ce stade, une limite importante du système et donc une piste d'amélioration réside dans la collaboration entre experts de différentes disciplines (sociologues, archéologues, historiens des techniques), ce qui n'a pas pu être évalué dans notre cas. La visualisation des thématiques représentatives des différents contextes pourrait être bénéfique.

En utilisant un script Python avec les modules networkx (<https://networkx.github.io/>) et numpy (<http://www.numpy.org/>), il est possible de calculer certaines propriétés du graphe généré par cette procédure :

²²La théorie C-K (pour *Concept-Knowledge*, c'est-à-dire Concepts-Connaissance) propose une méthodologie basée sur la théorie des ensembles afin de résoudre de faciliter la créativité dans le processus de conception (Hatchuel et Weil, 2002a)

- Densité du graphe : 0.001
- Degré maximum (nombre de voisins maximum pour un nœud du graphe) : 158
- Degré moyen : 4,7, soit presque 5 voisins en moyenne par nœud

Le nœud le plus connecté est celui lié à la fiche intitulée « Quai de la fosse ». En effet, cette fiche est connectée à 157 autres fiches. Au niveau $n + 2$, ce nœud est lié à 2052 voisins. Le nœud « Prairie au duc » est lui connecté à 2258 voisins de niveau $n + 2$. Il est possible de faire une interprétation simple du degré important de ces deux nœuds :

- le quai de la fosse est en effet un des quais de Nantes sur lequel un grand nombre d'entreprises de l'époque avaient pignon sur rue au début du XX^e siècle
- la prairie au duc est une ancienne île de Nantes, correspondant à la partie Ouest de l'actuelle île de Nantes. Un grand nombre de chantiers navals, dont les ACB « Ateliers et chantiers de Bretagne » et autres industries y sont présents à l'époque.

L'écart important entre le nombre de voisins pour les différents nœuds implique une étape de filtrage importante pour la conception d'une interface de visualisation à destination du public. En effet, il n'est pas envisageable d'afficher une centaine d'informations de manière simultanée.

Pour visualiser le graphe tel qu'il apparaît sur la figure 4.18, nous avons utilisé un logiciel aujourd'hui largement utilisé pour la manipulation et la visualisation de ce type de données : Gephi (Bastian *et al.*, 2009). Gephi permet de charger différents types de données, de se connecter à des bases de données comme MySQL ou Postgres, de sauvegarder les graphes créés dans différents formats (Gexf, ou GraphML notamment) et d'appliquer des algorithmes de spatialisation ou de statistiques. Dans notre cas, l'algorithme de spatialisation choisi est ForceAtlas2, un algorithme de spatialisation basé sur les forces (Jacomy *et al.*, 2012).

Remarque : La structure des données formant un graphe, il semble pertinent d'évaluer la pertinence de l'outil de gestion de base de données choisi. Par souci d'efficacité (compétences disponibles) et de compatibilité à l'heure de la réalisation du projet, un système dont la robustesse a déjà été éprouvée a été choisi : Postgres. Cependant, avec l'essor des technologies NoSQL²³, permettant une gestion de données ayant une structure plus souple, une piste d'étude pourrait être d'intégrer les données dans un outil comme Neo4j (<http://www.neo4j.org/>) permettant de bénéficier de la structure de graphe pour manipuler les données. Si l'implémentation a pu être effectuée et que Neo4j est effectivement tout à fait compatible avec le système proposé, la plus-value apportée par cet outil n'a pas été étudiée. Neo4j possède notamment un langage de requête (Cypher) intégrant de manière native des algorithmes de la théorie des graphes. Ce type d'approche pourrait donc offrir des perspectives en terme d'analyse d'hypothèses et leur répercussion sur le système (Lutters *et al.*, 2014).

Analyse de parcours historiques

Parmi les connaissances possibles à intégrer dans le système, la découverte et la définition de parcours au sein du réseau d'items (figure 4.19) forment une piste de recherche intéressante. Par « parcours », nous entendons un chemin²⁴ entre un item i et un item j . Ce cheminement peut être relatif à un (ou des) item(s) k faisant office de référence conceptuelle et considérée alors comme la (ou les) thématique du parcours. Le système de visualisation et d'interaction doit ainsi permettre à l'historien d'identifier d'éventuels chaînons (objets ou relations) manquants pour la cohérence du parcours. On retrouve ici l'analogie avec la théorie C-K mentionnée précédemment.

Le parcours peut ainsi être défini comme l'ensemble des items x_i (ou nœuds du réseau), i variant de 1 à n (x_1 et/ou x_n définis comme points de départ par l'utilisateur ou le système), et connectés « dans une

²³Le sigle NoSQL (Not only SQL) fait référence aux systèmes de gestion de bases de données ne reposant plus sur une structure relationnelle par tables et le langage SQL, mais sur d'autres paradigmes comme l'approche orientée document pour MongoDB ou encore orientée graphe pour Neo4j

²⁴En théorie des graphes, un chemin est défini par une suite d'arcs consécutifs reliant une origine x à une extrémité y .

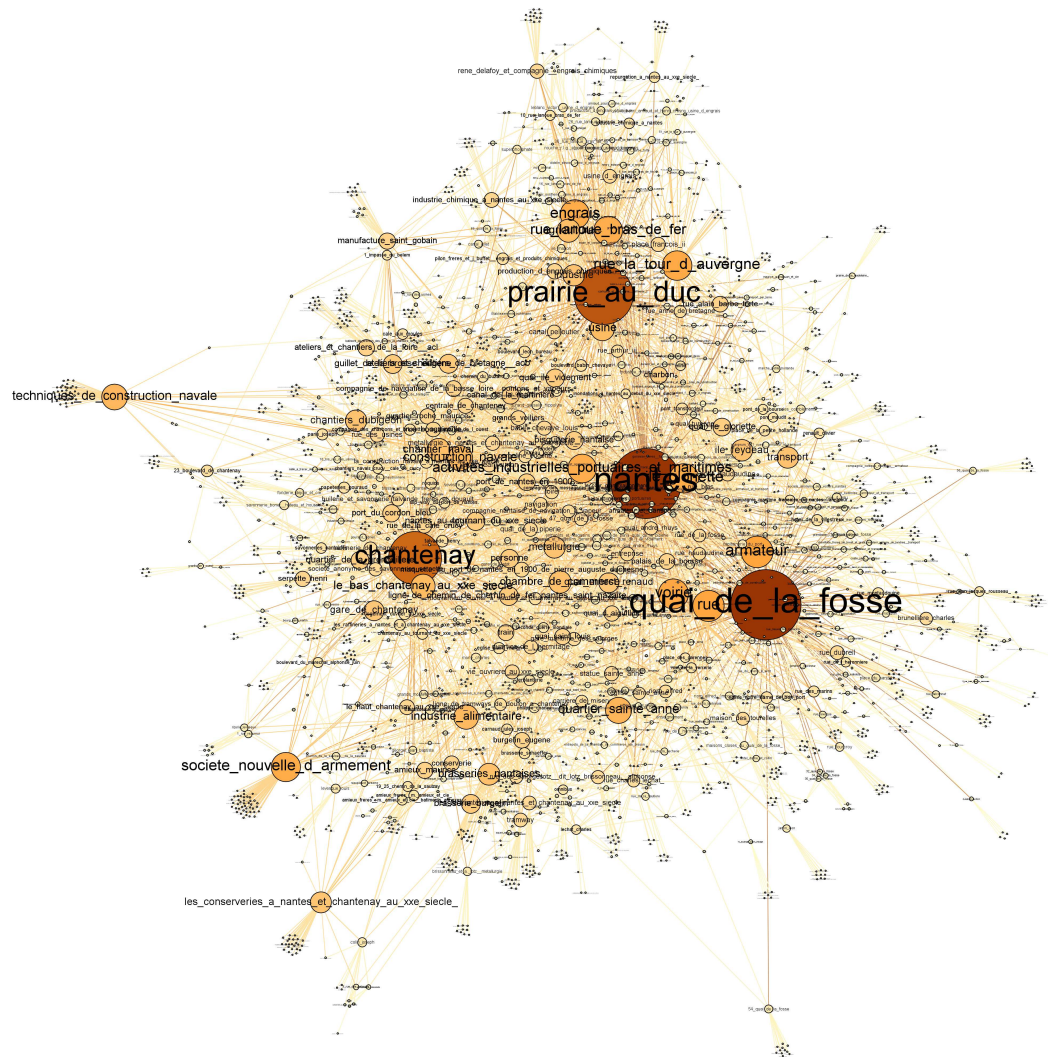


Figure 4.18 – Représentation du réseau formé par la mise en relation des fiches connaissance. La taille et la couleur des nœuds du graphe sont fonction du nombre de liens. Graphe réalisé avec le logiciel Gephi ([Bastian et al., 2009](#)).

certaine mesure » à un ou des items de référence r_k découlant du choix de l'utilisateur. Soit $G = (V, E)$ un réseau d'items, un item $depart \in V$ et $R = \{r_k \mid k \in \mathbb{N}, r_k \in V\}$ un ensemble d'items de référence. Un parcours P peut alors être défini comme un sous-graphe $SG = (SV, SE)$:

- $SV = \{x_i \in V \mid (x_i, r_k) \in E \text{ « dans une certaine mesure »}\}$ avec $\text{depart} \in SV$
- $SE = \{(x_i, x_j) \mid \forall i, x_i \in SV\} \cap E$

Nous utilisons volontairement l'expression « dans une certaine mesure », car il reste à définir les éventuelles règles pour la connexion des items d'un parcours aux items de référence. Par exemple, le parcours doit-il reposer sur une connexion systématique entre tous les items du parcours et les items de référence, ou bien seulement sur une connexion tous les n items? La condition « tous les nœuds du parcours sont liés à tous les items de référence » se traduirait par exemple par « $\forall i, \forall k, (x_i, r_k) \in E$ ». À partir de cette règle d'association, le système peut alors inférer de nouvelles relations et ainsi enrichir G et donc le SOC présenté au chapitre 3. D'autres conditions peuvent être étudiées, avec des règles plus souples, par exemple « $\forall i, \forall k, (x_{2i}, r_k) \in E$ » impliquant que le parcours peut passer par au plus un nœud non lié à un item de référence entre deux items liés à ce référent. On peut ainsi tester de nombreuses autres conditions, permettant une détection plus fine de ces parcours. Il faut néanmoins noter que cette problématique se pose uniquement dans le cas de l'implémentation d'une procédure automatisée basée

Les outils ont permis de rendre opérationnels à la fois le modèle conceptuel et la vue processus. Il est désormais possible pour les historiens d'enrichir le corpus autour de l'histoire du port de Nantes, de capitaliser de nouvelles connaissances et d'accéder aux informations présentes dans le système. Pour les professionnels du musée, la méthodologie mise en place a permis de concevoir une base de données rendant possible d'une part l'ajout et la modération de contenus mais également de décorréliser les dispositifs multimédia des contenus scientifiques.

La rétro-action liée à la structuration des données n'est cependant pas illustrée dans ce chapitre et cela constitue une perspective de recherche qui sera abordée à la fin de ce manuscrit.

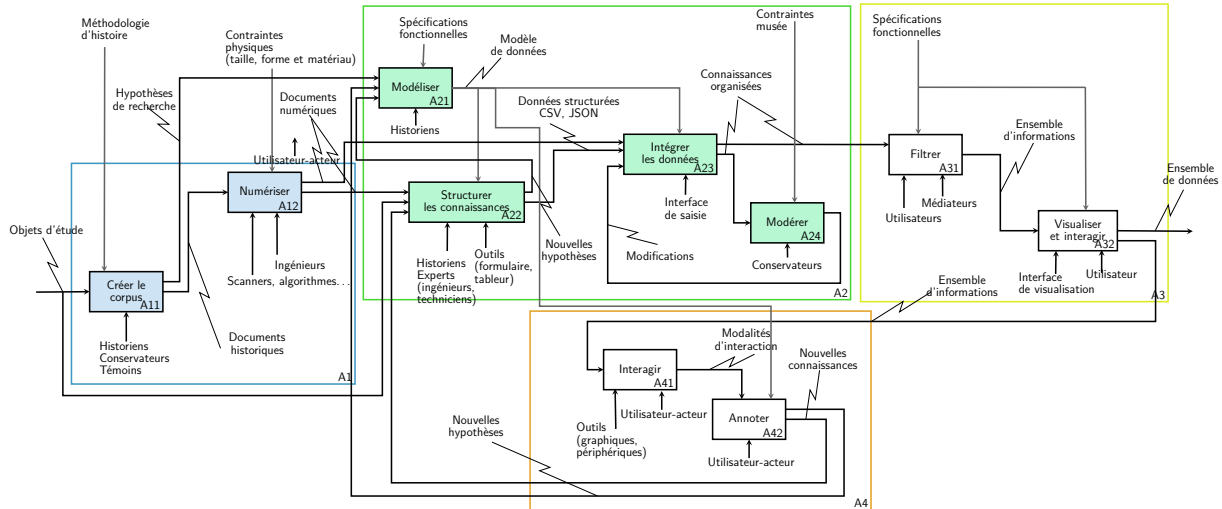


Figure 4.20 – Mise en évidence des activités de la méthodologie détaillée au chapitre 3 traitées dans ce chapitre

Chapitre 5

Systèmes de visualisation et d'interaction pilotés par les connaissances

Ce chapitre constitue la dernière proposition de la présente thèse, en détaillant l'intérêt des dispositifs de visualisation pilotés par les connaissances pour le processus de patrimonialisation. Deux dispositifs sont présentés :

- la mise en place d'un dispositif de réalité augmentée piloté par les connaissances et permettant la valorisation de l'objet patrimonial par la visualisation des informations associées. Ce dispositif est dédié aux visiteurs du musée et vise à répondre à la problématique industrielle initiale de valorisation d'un objet de collection qu'est la maquette du port de Nantes.
- un dispositif immersif complémentaire au dispositif muséographique visant à introduire de nouveaux éléments de réflexion. À partir d'un démonstrateur conçu avec le logiciel *Unity3D*, nous proposons une approche de visualisation et d'interaction permettant d'améliorer le processus de capitalisation des connaissances par une mise en contexte de l'utilisateur-acteur « spécialisé ». Cet outil est dédié à un usage expert pour l'enrichissement des modèles par l'historien et la mise en évidence de nouvelles hypothèses.

Ces deux systèmes permettent à la fois de comprendre le contexte de l'objet, de le valoriser mais également de capitaliser de nouvelles connaissances à partir des interfaces proposées.

5.1 Introduction

La démarche proposée dans ce chapitre combine la personnalisation des modes de représentation/visualisation des informations (en fonction du profil de l'utilisateur et de ses besoins) avec un système de capitalisation des connaissances pour la gestion des données en muséologie (figure 5.1).

Par rapport au modèle décrit par la figure 3.12 du chapitre 3, nous nous intéressons dans ce chapitre à la capitalisation des connaissances et à leur intégration dans le système d'organisation des connaissances (voir figure 5.2). L'objectif, en accord avec la méthodologie proposée au chapitre 3, est de permettre aux

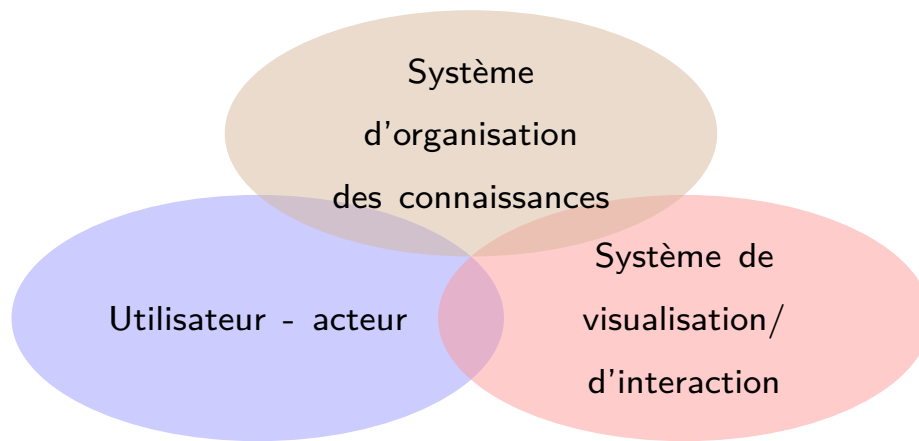


Figure 5.1 – Visualisation et capitalisation des connaissances historiques assistées par la réalité virtuelle

historiens d'interagir avec des informations historiques en combinant la manipulation de données sémantiques et physiques (la 3D dans le cas de maquettes urbaines). À terme, l'historien peut alors enrichir le modèle avec de nouvelles hypothèses ou capitaliser de nouvelles connaissances. Contrairement aux outils existants du génie industriel qui pilotent le système d'information par les objets manipulés via le PDM (Product Data Management, ou système de gestion des données produits en CAO), nous proposons ici de comprendre l'histoire d'un territoire ou d'un objet technique en manipulant les connaissances intégrées dans le système proposé au chapitre 3. La maquette numérique devient ainsi paramétrable et interprétable au moyen des connaissances qui lui sont associées.

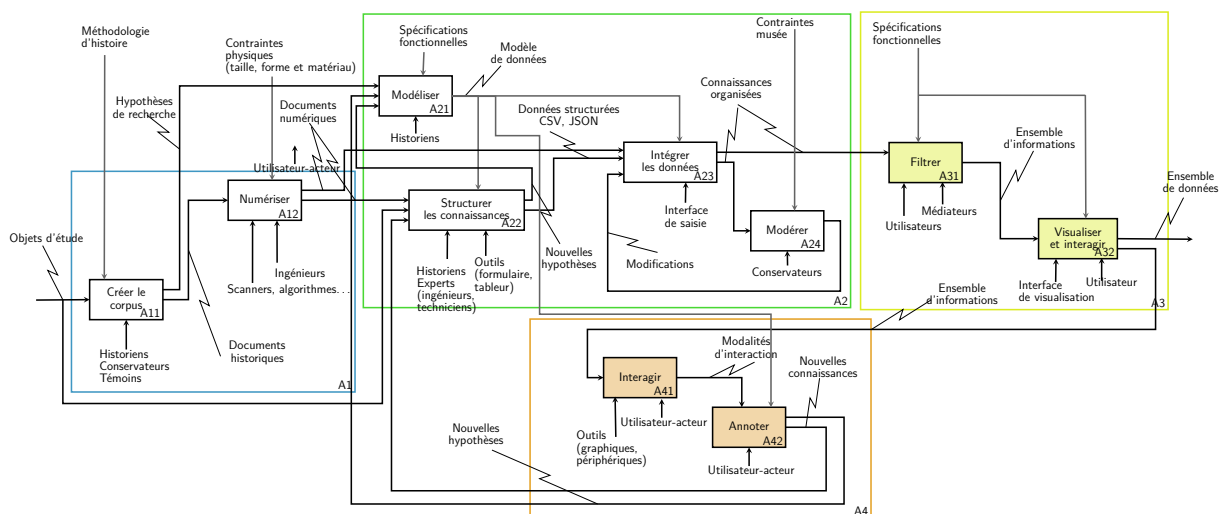


Figure 5.2 – Extrait de la figure 3.13 mettant en évidence les processus illustrés dans ce chapitre. Seule la rétro-action permettant de modifier la modélisation de l'activité A21 n'est pas traitée.

5.2 Dispositif muséographique de valorisation d'un objet patrimonial

L'objectif premier du musée d'histoire de Nantes était de valoriser scientifiquement la maquette du port de Nantes. Si la méthodologie proposée permet de constituer un système extensible et scientifiquement robuste en respectant les critères de la charte de Londres, la conception d'une interface muséographique connectée au système permettra de valider la dernière phase de valorisation.

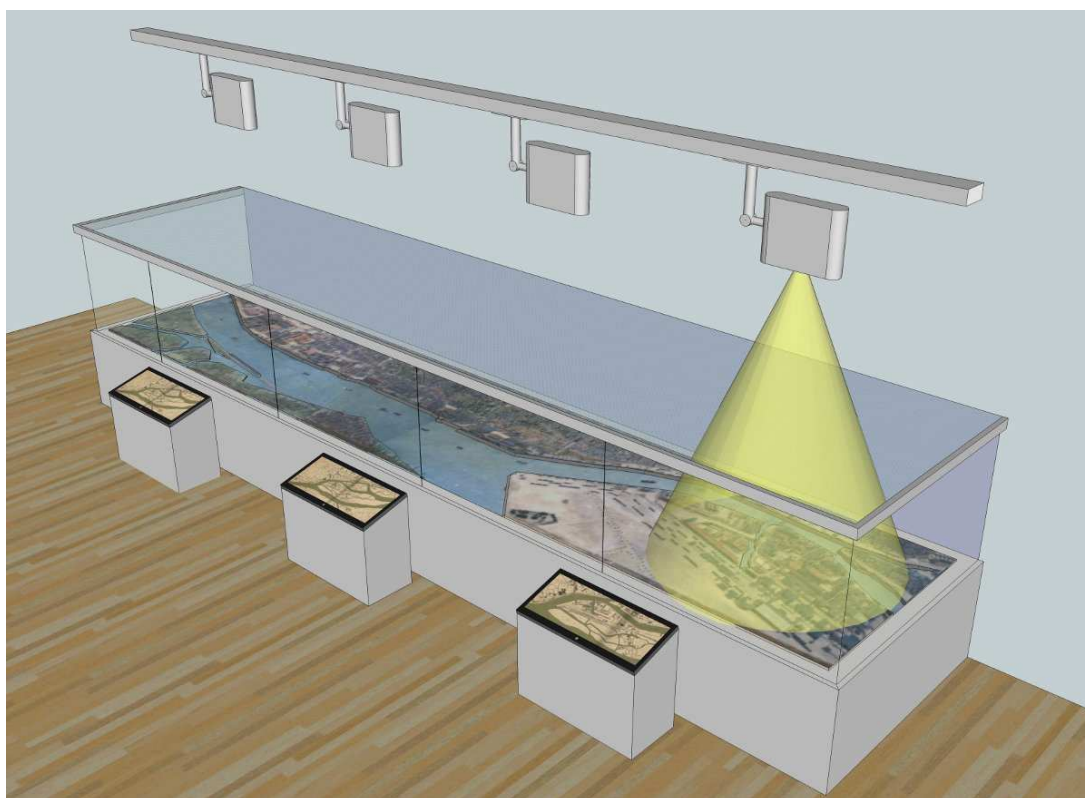


Figure 5.3 – Aperçu du dispositif muséographique final envisagé pour la valorisation de la maquette du port de Nantes en 1900 présentée en salle 21 du musée d'histoire de Nantes

Par ailleurs, l'association entre l'interface muséographique et le système de gestion du contenu permettra de valider la solution proposée pour résoudre la problématique industrielle.

Dans un souci de bon déroulement du projet de recherche et développement, un démonstrateur a été conçu pour valider les choix ergonomiques et les scénarios d'utilisation de l'interface. Cette partie détaille donc les différents composants de l'interface, les scénarios d'utilisation proposés et les résultats de l'évaluation auprès du public.

En terme de cahier des charges, les objectifs du dispositif souhaités par le musée sont les suivants :

1. Proposer aux visiteurs une interface d'accès et de manipulation intuitive des contenus disponibles relatifs à l'histoire du port de Nantes en 1900. Cela implique la prise en compte de profils d'utilisateurs hétérogènes (cf. chapitre 1) pour la conception de l'application.
2. Permettre à l'équipe de médiation du musée d'utiliser le dispositif muséographique et l'interface d'administration pour faciliter la préparation des visites guidées
3. Concevoir une interface qui soit décorrélée du contenu proposé, pour :
 - Garantir l'évolutivité du système en terme de contenu
 - S'abstraire de l'obsolescence des technologies matérielles
 - Anticiper la conception de nouvelles interfaces pour compléter l'offre proposée par le dispositif muséographique in situ
 - Anticiper la réutilisation de la méthode pour les autres objets du musée avec à terme un système global de gestion des informations liées aux objets de la collection du musée présents au cours du parcours.

La méthodologie proposée au chapitre 3 et appliquée à la maquette du port de Nantes comme détaillé précédemment dans ce chapitre, est appliquée pour la maquette du quartier Saint-Similien. Ainsi, nous construisons un corpus de documents historiques (documents d'archives et traces graphiques) associé à

un réseau de fiches connaissance. En parallèle, l'objet est numérisé et le modèle 3D en résultant est utilisé pour faire la liaison entre les données sémantiques et les éléments de la maquette.

Par rapport aux classes représentées figure 3.11, l'**interface** de visualisation est basé sur un **filtre** choisi en fonction du **contexte** que constitue l'objectif de médiation du musée. Par ailleurs, les visiteurs du musée ne sont des **utilisateurs-acteurs** qu'*a posteriori* après l'utilisation du dispositif. Il s'agit donc d'une interaction à deux niveaux :

- la visualisation d'informations via le dispositif muséographique à destination des visiteurs du musée ;
- la capitalisation possible de nouveaux éléments de connaissance par l'interface web présentée au chapitre 4.

Par ailleurs, en ce qui concerne le dispositif muséographique présenté ici, le **point de vue** associé à l'interaction avec l'objet patrimonial est celui du musée.

Ce démonstrateur permet de valider l'aspect reproductible de la méthodologie puisqu'elle peut être validée sur deux objets différents bien que similaires.

5.2.1 Présentation du dispositif

Une fois le système d'organisation des connaissances établi, nous avons conçu une interface d'accès aux contenus destinée aux visiteurs du musée. Le dispositif muséographique est constitué des éléments suivants :

- L'objet patrimonial, en l'occurrence la maquette du quartier Saint-Similien
- Une unité centrale, hébergeant une copie de la base de données constituée des fiches connaissance, des documents graphiques numérisés et du modèle 3D ainsi que l'application logicielle servant d'interface homme-machine
- Un écran tactile, pour la communication homme-machine
- Un vidéo-projecteur, servant à faire le lien entre les actions de l'utilisateur, le système d'information et l'objet patrimonial

De plus, chaque « poste » correspondant à un écran est équipé d'un lecteur de badge RFID dont l'utilité sera détaillée plus loin.

Le nombre d'éléments matériels est dépendant de la taille de l'objet. Par exemple, pour la maquette du port de Nantes, l'image 5.3 illustre le nombre d'écrans tactiles (choisis au nombre de trois avec une taille d'écran de 32") ainsi que le nombre de vidéo-projecteurs (dont la surface de projection doit être égale à la surface totale de la maquette). Par ailleurs, le nombre d'unités centrales (UC) est calculé selon les principes suivants :

1. une UC qualifiée de « maître » peut gérer un vidéo-projecteur ainsi que la communication entre toutes les UCs ;
2. chaque UC « esclave » peut piloter un écran tactile plus un vidéo-projecteur ;
3. $n_{UC} = \max(n_{VP}, n_{ecrans}) + 1$. Ce dernier principe ne s'applique pas dans le cadre du démonstrateur puisqu'il n'y a pas de communication à gérer entre différentes UCs.

La combinaison ainsi établie pour le dispositif muséographique de la maquette du port est illustrée figure 5.4.

Le dispositif proposé s'apparente donc à une « maquette historique augmentée » par l'ajout d'information sur une représentation virtuelle de l'objet sur l'écran ainsi que sur l'objet réel. Les visiteurs du musée peuvent ainsi interagir virtuellement avec l'objet, ce qu'ils ne pouvaient pas faire auparavant, pour des raisons de conservation de la maquette. Le système que nous présentons ici est un démonstrateur pour valider la faisabilité du dispositif muséographique envisagé pour valoriser la maquette du port de Nantes. Ce démonstrateur a été conçu autour d'une autre maquette d'un quartier de Nantes : la maquette du quartier Saint-Similien (figure 5.5).

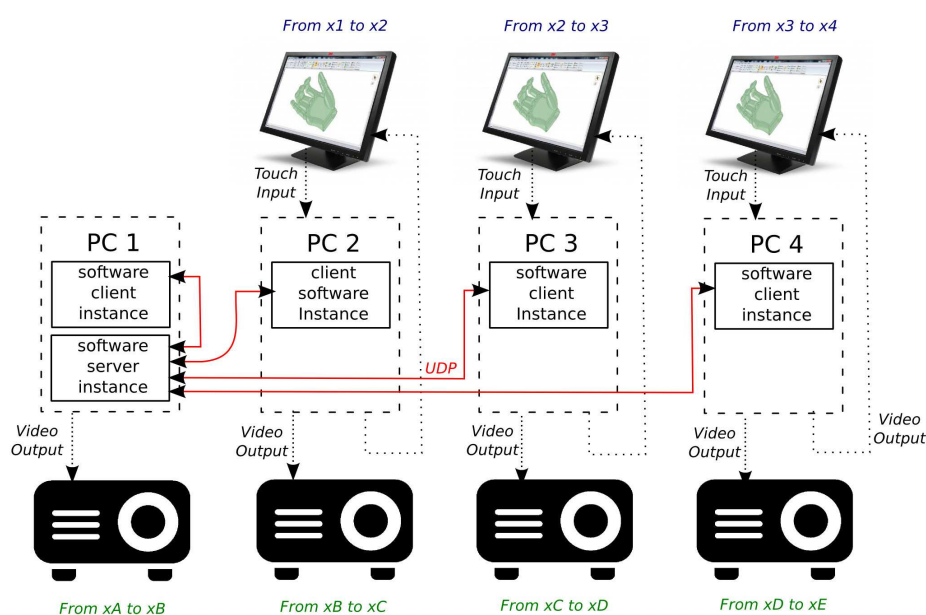


Figure 5.4 – Synoptique réseau envisagé pour le câblage des éléments audiovisuels et informatiques. Crédits : Arnaud Waels.

L'application *multitouch* (ou multipoints) réalisée par un prestataire extérieur ¹, est développée au moyen du framework Kivy².

Les données provenant de la base de données sont stockées au format JSON, et les coordonnées des zones renseignées sur la maquette sont stockées au format WKT. La partie du modèle 3D correspondante à chaque zone sélectionnée peut être visualisée au moyen du moteur de jeu 3D Panda3D.

L'application utilise le modèle 3D virtuel et la bibliothèque Polygon³ pour détecter automatiquement les zones de la maquette à illuminer à partir de la zone touchée par l'utilisateur sur l'écran. La procédure utilisée est la suivante :

1. Détection de la zone sélectionnée par l'utilisateur sur l'écran
2. Positionnement dans le modèle 3D selon le même point de vue que l'image
3. Identification de l'élément sélectionné en utilisant un lancer de rayon selon la direction choisie

Il faut noter que dans le cas où l'interface graphique choisie est l'orthophoto, la détection de la zone sélectionnée est immédiate car les coordonnées du polygone sont stockées dans la base de données.

En plus de ce calcul, le modèle 3D permet également de générer automatiquement la nouvelle zone sélectionnable sur l'interface lors de son ajout dans la base de données. En effet, selon le même principe que précédemment, chaque nouvelle élément référencé dans la base de données est « prédécoupé » afin d'être identifiable sur l'interface graphique.

Sans le modèle 3D, une étape manuelle supplémentaire de modification de l'image servant à l'interface dans un logiciel de traitement de photos deviendrait nécessaire.

Le code de l'application ne sera pas détaillé ici car cela ne rentre pas dans le travail de recherche de cette thèse. Seules les fonctionnalités ayant un lien avec la problématique de recherche seront abordées.

Remarque : Les différentes fonctionnalités de l'interface présentées ici découlent d'un processus de conception démarré à compter de la mise en place opérationnelle du démonstrateur en janvier 2013, avec

¹L'entreprise choisie pour le développement de l'application est devocité (<http://devocite.com/>), gérée par Arnaud Waels, et spécialisée dans la conception d'applications interactives pour les institutions culturelles

²Kivy kivy.org est une bibliothèque Python multi-plateforme sous licence MIT (pour les versions 1.7 et ultérieures) dédiée au développement d'applications tactiles basé sur le langage Python.

³<https://pypi.python.org/pypi/Polygon/2.0.4>

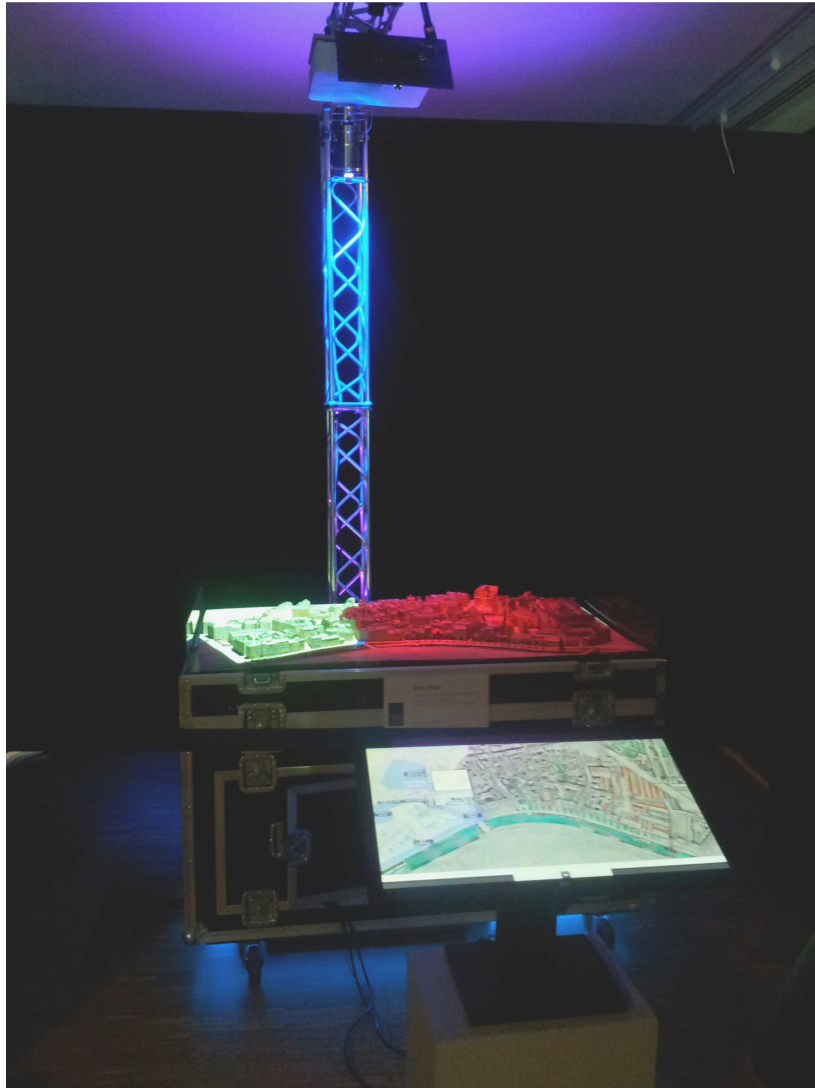


Figure 5.5 – Vue d'ensemble du dispositif muséographique servant de démonstrateur : l'écran tactile de 27" est disposé devant la maquette et un vidéo-projecteur est positionné au-dessus à une distance correspondant à la distance focale de la lentille du VP.

plusieurs phases d'évaluation. Ce processus n'étant pas finalisé au moment de la rédaction de ce manuscrit, les fonctionnalités décrites sont celles choisies au moment de la rédaction.

L'interface graphique de base de l'application est composée de deux photographies haute définition selon deux points de vue différents de la maquette :

- Une orthophoto (figure 5.6) de la maquette, permettant à l'utilisateur de l'application d'avoir une vue similaire à un plan de la maquette ;
- Une vue panoramique (figure 4.5a), imitant la vision qu'un visiteur aurait de la maquette une fois placé devant l'écran.



Figure 5.6 – Orthophoto de la maquette Saint-Similien réalisée par photogrammétrie.

Dans la suite, nous verrons les différents scénarios d'utilisation ainsi que les choix de conception. La difficulté principale relative à la conception de ce type d'interface réside dans la combinaison exhaustivité de l'information délivrée vs. interface épurée et intuitive. Obtenir une application comprise et manipulée par des utilisateurs extrêmement différents nécessite soit une application complexe par la gestion de nombreux scénarios d'utilisation, soit une application dont l'utilisation est la plus simple possible. Dans le cas d'une application muséographique, si la première catégorie semble correspondre au besoin, elle induit un coût de conception et une difficulté d'évaluation supplémentaires. Le choix s'est donc porté sur une interface nécessitant un apprentissage rapide et facilité, ce qui implique des compromis dans les choix de conception. Par exemple, utiliser une même gestuelle pour différentes actions implique un artifice supplémentaire comme un bouton. Ce type de choix pour une interface de logiciel classique ne pose pas de problème mais est réhébitorique pour une interface grand public. De même, multiplier les gestuelles (sélection à deux doigts, sélection non ponctuelle pour définir une zone par exemple) pour permettre d'augmenter le nombre d'actions possibles réduit la facilité d'apprentissage.

5.2.2 Cas d'utilisation

Scénario principal Le scénario d'utilisation principal est le suivant :

1. Navigation dans l'interface principale (figure 5.7), par défaut en mode panoramique. L'utilisateur peut, de manière tactile avec un ou plusieurs doigts : agrandir l'image, la déplacer, choisir la vue principale (orthophoto ou vue panoramique) et la langue de l'interface ;
2. Sélection d'une zone de la maquette en touchant l'écran avec un doigt ;

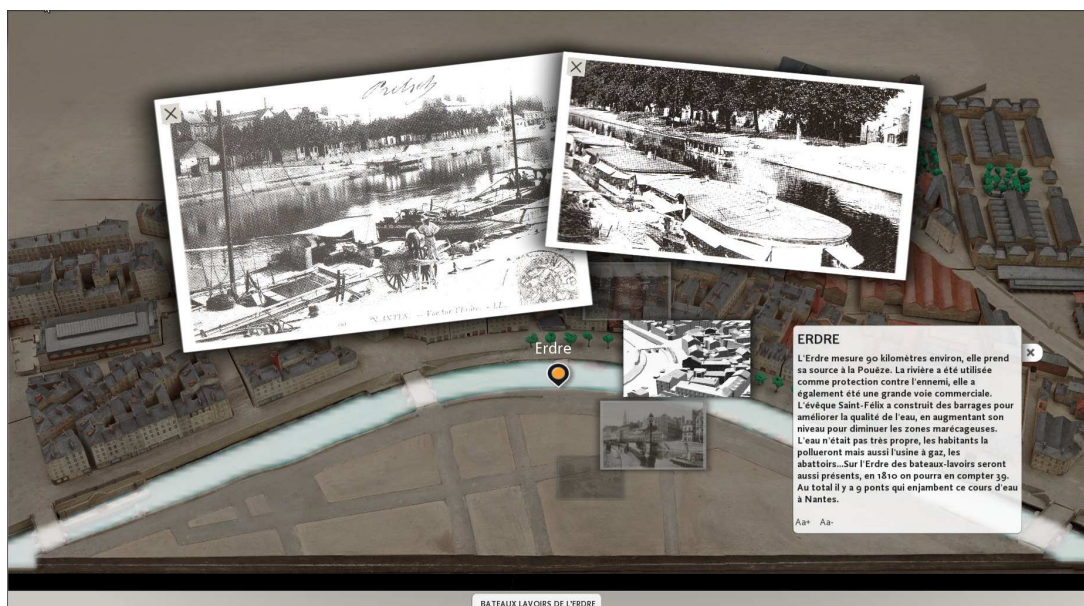


Figure 5.7 – Aperçu de l'interface graphique lors de la sélection d'un élément. L'ensemble des informations contenues dans la base de données s'affiche pour visualisation et des rebonds thématiques vers d'autres éléments sont proposés.

3. Si la zone sélectionnée ne correspond à aucune entrée dans la base de données, l'interface propose par une mise en surbrillance des zones proches de la sélection et un message incitant à contribuer au projet de capitalisation des connaissances ;
4. Si la zone sélectionnée correspond à une entrée dans la base de données :
 - La zone correspondante est mise en évidence par vidéo-projection sur la maquette ;
 - Un carrousel contenant les différents contenus disponibles relatifs à l'élément sélectionné : modèle 3D, documents d'archives graphiques, texte explicatif ;
 - Des rebonds thématiques vers des éléments de connaissance relatifs à l'élément sélectionné sont proposés selon deux modes : les éléments également présents sur la maquette sont mis en surbrillance sur l'écran et les éléments abstraits (catégories génériques, sujets thématiques, ou tout sujet n'ayant pas de représentation physique sur la maquette) sont positionnés sous forme de liens en bas de l'écran. Par exemple, si la zone sélectionnée est un pont, le système proposera à l'utilisateur de visualiser tous les ponts présents sur la maquette ;
5. Chacun des contenus présents dans le carrousel est sélectionnable individuellement, avec possibilité d'agrandissement et les méta-données nécessaires à son identification (référence bibliographique, titre, etc.) ;
6. La navigation est ensuite laissée libre pour l'utilisateur permettant la sérendipité.

Ainsi, chaque action de l'utilisateur génère un filtrage des informations présentes dans le système. L'interface muséographique peut s'apparenter à un iceberg pour lequel la partie émergée est celle des figures 5.7 (et 5.9) et la partie immergée est celle de la figure 5.8.

Afin de limiter les sélections portant sur des zones non étudiées (une couverture exhaustive de la maquette n'étant pas possible), nous avons introduit une catégorie d'éléments particuliers : les quartiers. Ainsi, la maquette est découpée en plusieurs quartiers si cela est pertinent d'un point de vue historique. Pour la maquette du quartier Saint-Similien, trois quartiers ont été identifiés : Talensac au Nord-Est, Marchix au Sud-Ouest et Saint-Similien au centre. L'affichage des données se fait donc en deux temps :

1. Tout d'abord la zone la plus large, i.e. le quartier, correspondant à la sélection est affiché ;
2. Ensuite, les éléments présents dans le quartier lui étant liés dans la base de données, ils sont mis en surbrillance dans un deuxième temps après un court délai (<3s).

3. Le médiateur peut alors choisir un ensemble de fiches à faire apparaître sur le dispositif, chacune associée à un identifiant dans la base de données
4. L'étape 3 est également valable pour la sélection de ressources graphiques
5. L'ordre d'apparition peut être modifié par l'auteur de la nouvelle visite
6. L'ensemble des informations est stocké dans la puce RFID

Une fois le badge programmé avec la liste des éléments à utiliser lors de la visite, le scénario d'utilisation du dispositif muséographique *in situ* est le suivant :

1. Badgeage des différents « postes » à utiliser. Cela permet au médiateur de prendre le contrôle d'un ou plusieurs écrans selon l'affluence du moment, apportant une souplesse supplémentaire pour la gestion des flux dans le musée.
2. Chaque écran affiche alors le premier élément programmé préalablement via l'interface de gestion dédiée
3. Le médiateur peut ensuite passer aux contenus suivants par un simple toucher sur un des écrans « contrôlés » et ainsi de suite
4. Une fois le discours de médiation terminé devant la maquette, un deuxième badgeage permet de mettre fin au verrouillage des écrans, qui se remettent dans leur mode de fonctionnement nominal.

Cette procédure a été conçue et validée en lien avec l'équipe de médiation du musée. **Nous apportons ici un élément supplémentaire pour valider l'hypothèse 2.1 : « Le système d'organisation des connaissances historiques permettrait d'optimiser la conception de dispositifs muséographiques grâce à une intégration des données et des processus métiers en amont de la phase de valorisation ».**

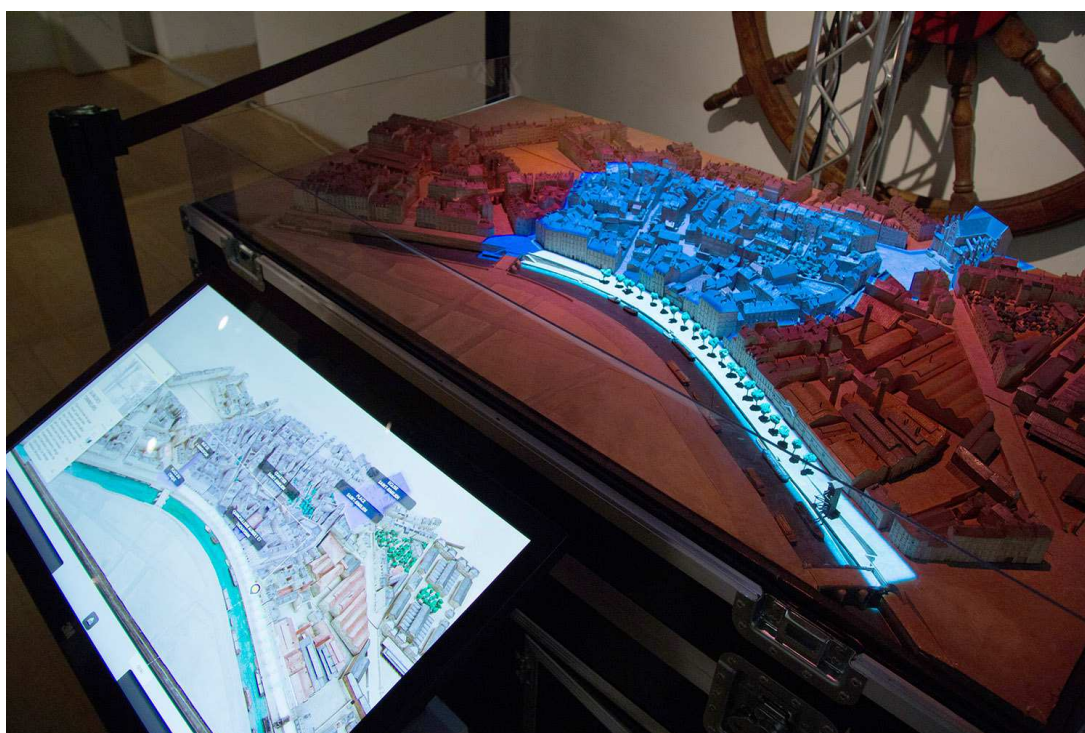


Figure 5.9 – Aperçu du dispositif lors de la sélection d'un élément. L'interface tactile est mise à jour et un masque lumineux est projeté sur la zone de la maquette correspondant à la sélection de l'utilisateur.

Pour l'instant, le dispositif n'offre pas la possibilité de contribuer à l'enrichissement de la base de connaissances directement par le biais de l'interface muséographique : ce sont des choix qui dépendent par électromagnétisme.

de la politique du musée et de l'appropriation de l'outil par le public du musée. La mise en place d'un tel système, outre les difficultés d'implémentation, implique une activité supplémentaire à prendre en charge par les équipes du musée.

5.2.3 Évaluation

Pour les besoins du projet, et comme cela est effectué par le musée pour chaque dispositif muséographique, nous avons mis en place plusieurs séances d'évaluation du dispositif. Ces séances ont permis à la fois d'améliorer l'application logicielle selon un cycle en spirale, et également d'évaluer l'appropriation du dispositif par les utilisateurs potentiels.

À l'heure de la rédaction de ce manuscrit, trois séances d'évaluations ont été menées pour le démonstrateur :

1. La première séance a été faite en interne parmi le personnel du musée d'histoire de Nantes. 20 volontaires ont été interrogés sur leur expérience du numérique ainsi que sur leurs attentes d'un tel dispositif.
2. La deuxième séance a été réalisée en positionnant le dispositif au sein même du musée, à côté de la maquette du port de Nantes en 1900 dans la salle 21. 80 visiteurs ont ainsi été observés dans leur manipulation du dispositif. Cette observation a permis d'identifier et de rectifier des choix ergonomiques posant problème. Certains ont été interrogés une fois la manipulation terminée.
3. La troisième et dernière séance s'est faite au cours d'une exposition ayant eu lieu lors de la conférence internationale Digital Heritage 2013. Durant 4 jours, nous avons pu observer l'utilisation du dispositif par les quelques 5000⁵ visiteurs de l'exposition. En parallèle de cette observation, un programme développé en Python a permis d'enregistrer toutes les actions des utilisateurs. Une partie des résultats de cet enregistrement est proposé sur la figure 5.10.

Les résultats provenant des séances 1 et 2 ont été rédigés dans une note interne (proposée en annexe D) à destination de l'équipe de direction et a servi à l'identification des pistes d'amélioration et de la plus-value apportée par ce dispositif. Évidemment, d'autres séances auront lieu pour l'évaluation du dispositif final, une fois celui-ci mis en place dans le musée en 2015.

Les résultats provenant de la séance 3 (présentés dans l'annexe E) ne font pas de distinction d'âge ou de sexe, il s'agissait seulement d'obtenir des données quantitatives sur les modes d'utilisation du dispositif : accès aux différents éléments, temps de consultation, etc.

Indications qualitatives Quelques résultats intéressants apparaissent suite à ces observations. Il apparaît que le système proposé permet aux utilisateurs de mieux comprendre l'histoire de la ville, et de se repérer. En terme de repérage, il reste difficile pour des visiteurs non nantais de se repérer par rapport à une maquette de la ville telle qu'elle était il y a 100 ans. Il ressort des entretiens que *cette aide à la compréhension se fait par la mise à disposition conjointe d'un ensemble de contenus et de connaissance*. C'est un élément important pour la validation de l'hypothèse 1 et pour la constitution d'un système d'organisation des connaissances efficaces : la simple accumulation d'informations, sans hiérarchie ou données structurées permet d'acquérir de nouvelles connaissances.

Par ailleurs, le dispositif crée une émulation de groupe. C'est là aussi une information intéressante pour la gestion de connaissances et leur valorisation, ainsi qu'un avantage significatif du point de vue des professionnels du musée. Ainsi donc, nous observons que les utilisateurs emploient différentes techniques de navigation dans les informations mises à disposition :

- Aperçu rapide des contenus disponibles permettant d'acquérir un éventail large mais sommaire d'informations
- Accès méthodique à chacun des éléments proposés pour une acquisition exhaustive de connaissances

⁵Ce chiffre est une estimation fournie par les organisateurs de la conférence et inclut les 600 congressistes

- Accès thématique par type de contenu selon le profil de l'utilisateur : lecture du texte uniquement ou visualisation des contenus graphiques uniquement

Enfin, nous observons que le système de retour d'information lumineux par vidéo-projection permet de capter le regard de l'utilisateur sur l'objet patrimonial. Ainsi, l'approche proposée permet d'enrichir l'objet grâce au virtuel sans se substituer à lui, le véritable témoin patrimonial. Cela permet de valider l'intérêt de ce type d'outil, même si encore une fois, les deux maquettes ont un attrait naturel différent : la maquette du port de Nantes attire l'œil naturellement par sa taille et la diversité des éléments qui y sont présents.



Figure 5.10 – Résultats statistiques des sélections des utilisateurs sur le dispositif de démonstration durant 3 jours d'exposition.

Indications quantitatives Les indications suivantes proviennent de la séance d'observation n°3 sur 4 jours d'enregistrement. Le programme développé pour l'occasion permettait d'enregistrer l'identifiant de chaque élément sélectionné ainsi que du temps de consultation pour chaque élément.

La figure 5.10 permet de repérer les trois quartiers principaux. Le choix du scénario d'utilisation avantage clairement les grandes zones géographiques, mais permet de donner l'accès à l'intégralité des éléments, quelle que soit leur taille, car ils se trouvent mis en surbrillance lorsque le quartier auxquels ils appartiennent est sélectionné. Par exemple, l'« élévateur à charbon », situé sur le quai des Tanneurs dans le quartier Talensac est particulièrement difficile à repérer. Cependant, lorsque le quartier est sélectionné, il se voit attribuer une étiquette le mettant clairement en évidence.

Il est intéressant de souligner le pourcentage de ressources sélectionnées lorsqu'un élément est choisi. Dans ce cas, un carrousel apparaît, proposant à l'utilisateur l'ensemble des documents historiques disponibles (vue 3D, texte explicatif, documents graphiques numérisés). Bien que le carrousel mette en avant le texte explicatif en le positionnant au premier plan, presque 70% des éléments du carrousel sélectionnés sont des images. Par ailleurs, 50% du nombre total d'images a été vu au cours de ces 4 jours d'exposition.

Enfin, en terme de temps d'accès, les données enregistrées montrent que les utilisateurs passent environ 5 secondes sur chaque élément affiché sur l'interface. La séance n°2 nous apprend également que les visiteurs ne passent que 2 à 5 minutes sur le dispositif, ce qui s'explique par le phénomène d'économie de la visite, identifié dans (Hadid *et al.*, 2012).

Remarque : il est important de noter que ces observations ne permettent pas d'évaluer l'impact du dispositif final. En effet, les deux maquettes sont singulièrement différentes, en terme de taille mais également de profil. En effet, le quartier Saint-Similien étudié par le démonstrateur ne présente que très peu d'éléments significatifs. La majorité du quartier est occupé par des ensembles résidentiels. Le relief et la diversité des éléments urbains sont beaucoup moins importants que sur la maquette du port de Nantes en 1900. La maquette du port de Nantes en 1900 possède donc un attrait « naturel » que la maquette

du quartier Saint-Similien n'a pas. Par conséquent, il n'est pas possible de déduire des observations le comportement des utilisateurs sur le dispositif final.

5.2.4 Conclusion sur le dispositif muséographique

Le dispositif muséographique réalisé et l'interface d'accès qu'il embarque permettent de valider plusieurs hypothèses de ce travail de recherche :

- la reproductibilité de la méthode, celle-ci étant appliquée sur deux maquettes des collections du musée.
- l'utilisabilité de la méthode et des outils : en parallèle de l'interface de gestion présentée plus haut, les résultats des séances d'évaluation du démonstrateur ainsi que les retours de la part des équipes du musée permet de valider l'intérêt de la méthodologie et l'utilité des outils proposés pour répondre à la problématique industrielle.
- enfin, en tant que système de visualisation dédié au patrimoine culturel, le dispositif rentre dans le cadre de la London Charter. Le respect des différents critères permet de valider le concept et l'approche proposés.

Bien sûr, cet outil doit être considéré comme un objectif industriel atteint, mais il ouvre de nombreuses autres pistes : prise en compte des contributions des utilisateurs, collecte virtuelle de documents historiques, impact du numérique sur l'appropriation du patrimoine culturel, etc. En effet, la phase de capitalisation telle que proposée au chapitre 3 est induite par l'utilisation de l'interface muséographique. En effet, en accédant aux informations disponibles sur la maquette, l'utilisateur est alors capable d'identifier des informations manquantes, c'est-à-dire le delta séparant les connaissances du système avec ses connaissances propres. Ainsi, non seulement l'utilisateur peut acquérir tout ou partie des connaissances existantes dans le système mais peut également devenir acteur en intégrant de nouvelles données ou en formalisant ses connaissances. Cette capitalisation ne peut se faire immédiatement au travers de l'interface muséographique mais au moyen de l'interface de gestion accessible sur le web. Nous verrons dans le chapitre 5 comment faciliter cette phase de capitalisation pour des utilisateurs-acteurs experts.

Par ailleurs, le dispositif proposé ici n'est qu'une forme d'interface possible avec les connaissances historiques capitalisées selon la méthodologie proposée dans ce manuscrit. En effet, il faut désormais envisager d'autres interfaces, complémentaires avec la visite *in situ*, permettant de prolonger l'expérience de visite hors les murs du musée, et ainsi de multiplier les possibilités d'interaction avec notre patrimoine.

Enfin, la politique de diffusion des résultats de ces travaux peut jouer un rôle dans l'avancement de ces recherches. L'objectif du projet mené par le musée est de développer la collaboration communautaire, dans l'esprit du logiciel libre, où les modifications apportées par d'autres utilisateurs peuvent améliorer les premières versions. Ainsi, que ce soit pour l'utilisation et l'enrichissement du contenu par d'autres institutions ou bien l'amélioration de fonctionnalités logicielles ou matérielles des interfaces d'accès comme le dispositif muséographique, la diffusion de ces résultats ne peut mener qu'à l'amélioration des méthodes et des outils destinés à la valorisation du patrimoine.

5.3 Système immersif pour l'exploration et la manipulation de données historiques

Dans cette partie, nous proposons un système complémentaire à celui proposé section 5.2 pour apporter des éléments de validation de l'hypothèse 2.2 décrite au chapitre 2 et formulée comme suit :

Hypothèse 2.2 : La méthodologie basée sur une gestion des connaissances historiques permettrait de proposer des éléments d'aide à la décision pour la création du récit historique en pilotant la visualisation des données par les connaissances plutôt que par les données physiques.

Le démonstrateur proposé permet d'étudier les possibilités d'accès aux connaissances et de leur manipulation possible de manière contextualisée, c'est-à-dire dépendant des utilisateurs-acteurs internes (historiens). En effet, la réalité virtuelle, par la mise en situation immersive et les modalités d'interaction possible, permet d'approfondir la recherche d'informations et la capitalisation des connaissances.

5.3.1 Objectifs

Nous avons vu à la fin de la section 5.2 que la capitalisation de connaissances issues de l'interaction avec le dispositif muséographique de réalité augmentée sur la maquette ne se fait que dans un second temps. Le système immersif proposé ici vise à combler ce manque en proposant une interaction en temps réel entre l'utilisateur-acteur et le système d'organisation des connaissances.

La visualisation et la manipulation de données historiques dans un environnement virtuel impliquent plusieurs difficultés relatives autant à l'ergonomie de l'interface utilisateur qu'à la visualisation d'information et leur manipulation. Il existe de nombreux travaux dans le domaine des interfaces utilisateurs en réalité virtuelle que ce soit pour la navigation au sein d'environnements physiques 3D (Bowman, 1997; Bowman *et al.*, 2008), la manipulation de données sémantiques (Rocha Oliveira *et al.*, 2002; Halpin *et al.*, 2008; Pick *et al.*, 2010; Ben Said, 2012; Greffard *et al.*, 2013; Greffard, 2013) ou la conception collaborative de produits (Bennes, 2013).

Ici, nous ne nous concentrons pas sur les problématiques de conception en environnement immersif mais plutôt sur les bénéfices d'une approche de gestion de connaissances historiques basée sur la réalité virtuelle.

En ce qui concerne la réalité virtuelle et le patrimoine culturel, de nombreux travaux de recherche ont vu le jour (voir la section 2.5 du chapitre 2) pour étudier l'utilité des interfaces immersives pour le patrimoine en général et le plus souvent pour l'archéologie (Champion, 2011; Roussou, 2002; De Luca *et al.*, 2011) mais également pour le patrimoine industriel (Laroche *et al.*, 2006; Cotte *et al.*, 2008). En effet, la restitution des savoirs et savoir-faire techniques relève du patrimoine immatériel. L'interaction au sein d'un environnement virtuel permet ainsi de mieux comprendre et restituer le patrimoine matériel et immatériel si difficile à faire percevoir avec les techniques de valorisation habituelles. En ce basant sur les résultats de ces travaux, nous faisons l'hypothèse qu'un travail scientifique de visualisation pilotée par les connaissances (provenant d'un système d'information comme proposé au chapitre 3 peut être appuyé par les outils de réalité virtuelle. Deux critères importants à prendre en compte sont le discours scientifique et les utilisateurs finaux comme le préconisent les chartes de Londres, de Séville et plusieurs autres travaux scientifiques (Rahaman *et Tan*, 2010; Tan *et Rahaman*, 2009; Flynn, 2008).

Notre approche anthropocentrée permet d'adapter la visualisation des données physiques en fonction du profil ou du point de vue de l'utilisateur, des hypothèses de recherche envisagées et du niveau de détail souhaité.

En résumé, les objectifs sont les suivants :

1. assister les **utilisateurs-acteurs** du public interne (experts, historiens, conservateurs) dans le processus d'écriture de l'histoire : établir des connexions entre les fragments de **connaissances** et les **sources**, les manipuler, effectuer des simulations, les visualiser pour analyser telle ou telle hypothèse ;
2. proposer une nouvelle façon d'interagir et de comprendre le patrimoine ainsi que de nouveaux outils d'aide à la décision en complément des méthodes classiques de l'histoire, de l'histoire des techniques et de la muséologie ;

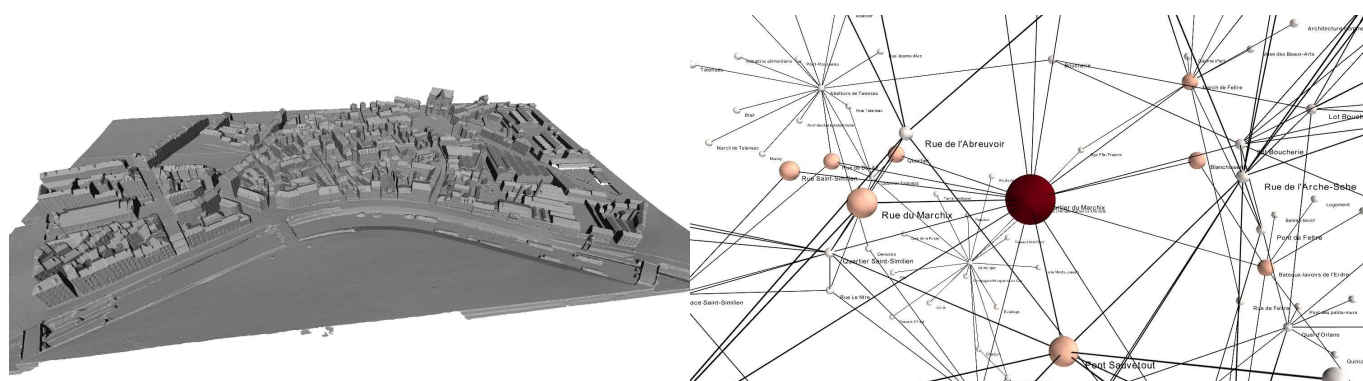


Figure 5.11 – Informations manipulées : modèle 3D numérisé (a) et réseau sémantique (b).

3. automatiser l'interfaçage entre le système d'information encapsulant les connaissances historiques et les utilisateurs : assister la capitalisation des connaissances pour l'épistémologie, faciliter l'interopérabilité au niveau des interfaces (tout en permettant un traitement personnalisé des informations selon les applications spécifiques : muséologie, recherche, tourisme) ;
4. proposer un nouveau paradigme de représentation des données 3D par la manipulation de concepts sémantiques.

Cette proposition est complémentaire au dispositif muséographique conçu pour la valorisation des maquettes du musée d'histoire de Nantes, le système proposé ici peut s'abstraire de l'objet physique. Cela permet de pouvoir explorer les informations sémantiques uniquement pour l'interprétation des connaissances formalisées dans le SOC selon d'autres modes de navigation.

5.3.2 Méthodologie

Notre proposition consiste à concevoir un environnement de réalité virtuelle à destination du public interne et externe (cf. chapitre 3). L'objectif est de comprendre et d'analyser les données historiques (voir figure 5.11) : étude de l'organisation d'un territoire, d'un milieu urbain, d'un système de production (chantier naval), d'un milieu socio-technique, etc. Cette compréhension passe nécessairement par l'articulation de différents schèmes (voir chapitre 3 et (Laroche, 2007)). Nous faisons ici l'hypothèse que cette interaction peut être facilitée grâce aux outils de la réalité virtuelle. Cependant, une telle approche n'est pas seulement bénéfique pour un public interne (ou expert) en tant qu'outil d'aide à la décision mais également pour le public externe comme aide à la compréhension et à l'appropriation du patrimoine tangible et intangible. Cela peut également permettre de mieux valoriser le travail de recherche en histoire en restituant le processus d'écriture de l'histoire au public (démarche intellectuelle) et d'y participer.

À l'instar du dispositif muséographique présenté dans la section 5.2, nous nous intéressons ici à la visualisation de connaissances historiques liées à un objet patrimonial et aux possibilités d'interaction offertes aux utilisateurs (cf. figure 3.10 du chapitre 3). L'étude est ici focalisée sur le public interne, c'est-à-dire en l'occurrence les historiens, et dans quelle mesure ces utilisateurs peuvent devenir acteurs du système.

Il s'agira également d'identifier les limites du modèle proposé au chapitre 3 relatives au processus de capitalisation des connaissances.

Le scénario étudié et envisagé pour le système immersif proposé est le suivant :

1. En fonction d'un **contexte** dans lequel un utilisateur inscrit sa démarche intellectuelle, ce dernier définit un filtre pour la visualisation des connaissances disponibles sur l'objet patrimonial étudié ;
2. L'**interface de visualisation et d'interaction** choisie met à disposition de l'utilisateur les informations contextuelles, en fonction du **filtre** défini précédemment et des caractéristiques de l'interface (affichage 2D ou 3D, périphériques d'interfaçage, etc.) ;

3. L'utilisateur explore alors les informations disponibles, selon les modes de visualisation possibles et en accord avec son point de vue. Le système doit pouvoir à la fois proposer les contenus relatifs au contexte dans lequel l'utilisateur effectue sa recherche, mais également des contenus « d'ouverture » pour lui permettre de sortir de son schéma de recherche pré-défini ;
4. Selon les différences entre les connaissances de l'utilisateur et celles présentes dans le SOC, l'utilisateur peut devenir acteur et enrichir les connaissances existantes dans le système avec ses propres **cognitons**. Les nouvelles connaissances peuvent prendre différentes formes :
 - de nouveaux items, que ce soit des relations ou des objets, formalisés sous la forme d'une fiche ;
 - la documentation d'items à partir de documents historiques nouveaux ou existants ;
 - une annotation, décrivant le point de vue de l'utilisateur-acteur sur des éléments de connaissance en particulier.
5. Le système réagit alors aux actions de l'utilisateur-acteur par la modification de la scène virtuelle. Ces modifications peuvent alors être à nouveau interprétées par l'utilisateur, qui peut valider ou non ses actions. Cette étape peut être itérée

D'un point de vue conceptuel, l'objectif est de permettre à un utilisateur de créer son propre espace de réflexion à partir des connaissances existantes, puis de pouvoir intégrer le cas échéant ses connaissances au SOC existant.

5.3.3 Proposition d'une interface de visualisation

L'interface proposée s'appuie sur le corpus documentaire relatif à la maquette Saint-Similien, provenant des collections du musée d'histoire de Nantes (voir figure 4.5).

5.3.4 Typologie des informations manipulées

La visualisation d'informations historiques dans un environnement 3D est une tâche complexe car il s'agit de gérer des informations hétérogènes, physiques ou conceptuelles, fortement connectées et dépendant de temporalités multiples et de spatialités multiples.

Pour le développement d'une interface cohérente et valider la reproductibilité de la méthodologie générale de ce travail de recherche, nous choisissons d'utiliser la même représentation des données que celle du dispositif muséographique présenté section 5.2. Chaque élément d'intérêt (item) est donc associé à une fiche connaissance dans la base de données contenant des métadonnées, des liens vers des documents textuels ou iconographiques, ainsi que vers des représentations 3D.

Trois types de données sont donc utilisés pour la visualisation d'information au sein de l'interface (Figure 5.12) :

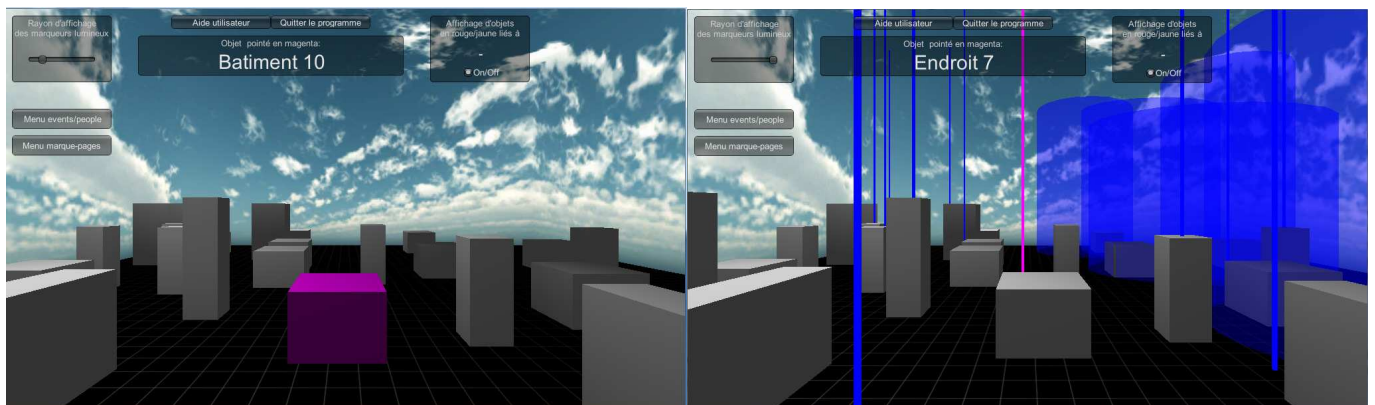


Figure 5.12 – Représentation des éléments géo-localisés avec (a) ou sans (b) géométrie 3D dans la scène virtuelle.

- éléments géolocalisés avec une géométrie 3D : bâtiments et mobilier urbain par exemple. Les contenus historiques inhérents à ce type de données sont facilement accessibles par identification ou sélection au sein du modèle 3D virtuel (figure 5.12a)
- éléments géolocalisés sans géométrie spécifique. C'est le cas des zones n'ayant qu'une valeur conceptuelle comme les quartiers. Afin de visualiser ces éléments, des indicateurs visuels sont intégrés dans la scène 3D et peuvent être sélectionnés comme par exemple : des « drapeaux » pour les éléments ponctuels (ou géolocalisés de manière ponctuelle) et des halos transparents de zone pour les surfaces polygonales (figure 5.12b).
- éléments n'ayant pas d'existence physique ou ne possédant pas d'informations de géolocalisation comme les acteurs ou les événements historiques (dans certains cas) ou des ensembles personnalisés. Ces informations ne peuvent pas être représentés simplement dans la scène 3D virtuelle, l'accès se faisant donc par le biais de métaphores de représentation (boutons ou menus).

Un des objectifs principaux pour l'historien est d'établir des correspondances entre différents éléments physiques ou conceptuels. Par conséquent, chaque éléments sélectionné propose dans sa fiche descriptive une liste des éléments liés conformément à la figure 5.11b et les met en évidence, quand cela est possible, dans la scène 3D comme sur la figure 5.13.

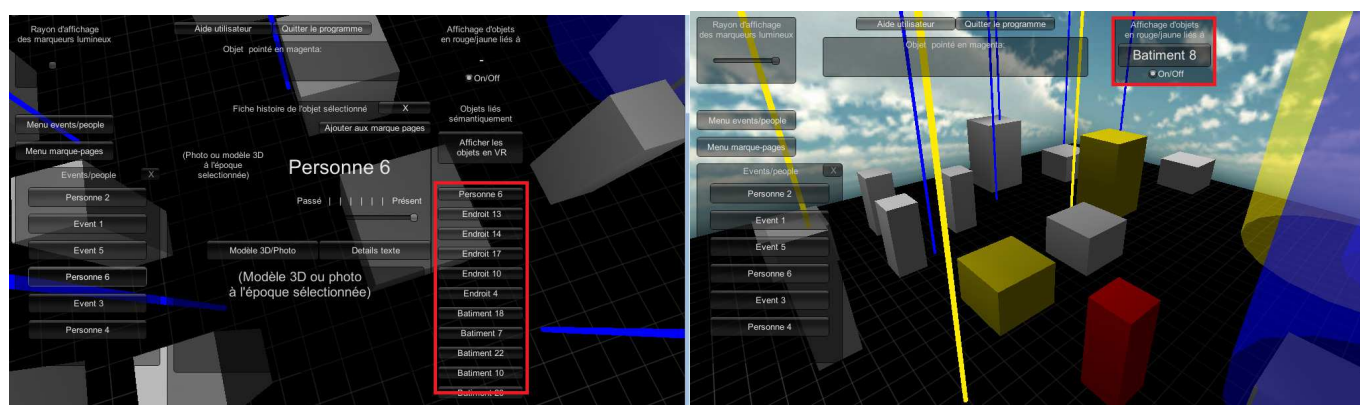


Figure 5.13 – Visualisation des connexions entre les éléments dans la scène 3D virtuelle (ici la scène 3D est une scène fictive pour illustrer les métaphores de signalisation).

De même, l'historien a la possibilité de créer ses propres « groupes d'intérêts », en ajoutant des descripteurs faisant sens pour lui lorsqu'il explore la ville virtuelle. Il peut ainsi utiliser un système de marque-pages pour associer des éléments à un groupe ou bien créer de nouveaux groupes. Du point de vue conceptuel, il s'agit ici en fait de créer, modifier ou supprimer des associations au sein de la base de données.

5.3.5 Affichage et navigation dans la scène virtuelle

Pour la réalisation d'un prototype de démonstration et de validation des hypothèses, nous avons choisi d'utiliser le logiciel Unity⁶ avec l'aide précieuse de Quentin Lemée, étudiant de l'option Ingénierie du Virtuel et de l'Innovation des Arts et métiers ParisTech Laval.

Nous proposons plusieurs méthodes pour l'exploration et la manipulation des ces données.

Visualisation du réseau sémantique

Afin de pouvoir s'abstraire de la réalité physique du territoire urbain (ou de tout élément tangible) et mieux se concentrer sur la sémantique et l'articulation des concepts manipulés, l'application développée

⁶Unity <http://unity3d.com> est un environnement de développement de jeux interactifs temps réel publié par Unity Technologies. Ce logiciel a la particularité de proposer une licence d'utilisation gratuite pour des projets non commerciaux.

propose une première scène dans laquelle chaque entité présente dans la base de données est représentée par un nœud. Le réseau ainsi constitué est alors similaire à celui de la figure 4.18 du chapitre 4.

Le placement de ces éléments est aléatoire et la représentation s'abstrait de toute particularité visuelle (cf. figure 5.14). Lors de la sélection, un positionnement en 3D selon trois niveaux s'effectue :

- le premier niveau contient l'élément sélectionné n
- le deuxième niveau contient les éléments connectés à n au niveau $n + 1$
- le troisième niveau contient alors les éléments connectés au niveau $n + 2$

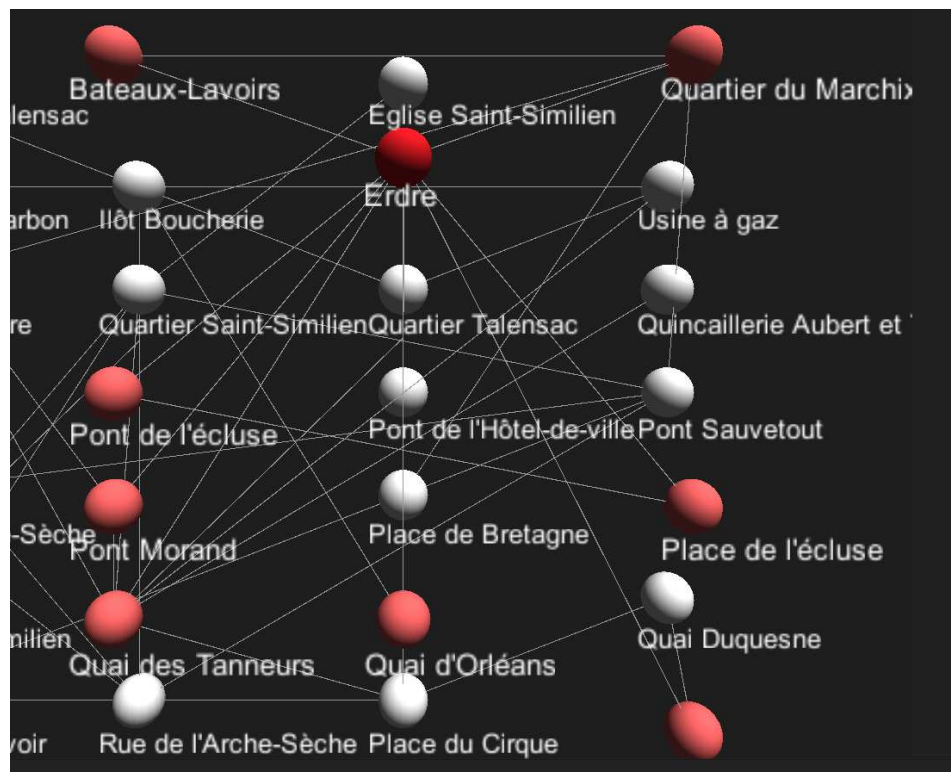


Figure 5.14 – Représentation 3D des entités sémantiques et leurs connexions dans la base de données (cf. figure 5.8)

Il est possible de manipuler en trois dimensions le réseau sémantique. Ce mode de visualisation permet d'étudier l'articulation des éléments présents dans le système et au besoin de modifier ces connexions. À terme, un système de filtrage des informations affichées est à envisager pour rendre cette scène lisible dans le cas d'une taille de réseau conséquente (plusieurs centaines ou milliers de nœuds). Ce filtrage pourrait s'effectuer au moyen d'indicateurs ou de descripteurs sémantiques permettant, par exemple, une sélection par thématique (« afficher les éléments relatifs à la construction navale au XX^e siècle »).

Visualisation de la scène urbaine 3D virtuelle

Premièrement, l'utilisateur peut naviguer librement dans la scène (cf. figure 5.15) : cela permet de visualiser la scène et les informations disponibles selon plusieurs points de vue (spatiaux). Il peut également naviguer de manière accélérée vers les différents éléments en sélectionnant un point de chute. La démarche est donc une recherche d'information basée sur le principe « overview first, zoom and filter, then details on demand » (Shneiderman, 1996).

Chaque élément de la scène renseigné dans la base de données peut générer l'affichage d'une fenêtre de consultation des informations qui lui sont liées (figure 5.16). Plusieurs opérations sont alors possibles :

- visualiser de manière conceptuelle ou dans la scène 3D les éléments qui lui sont liés ;

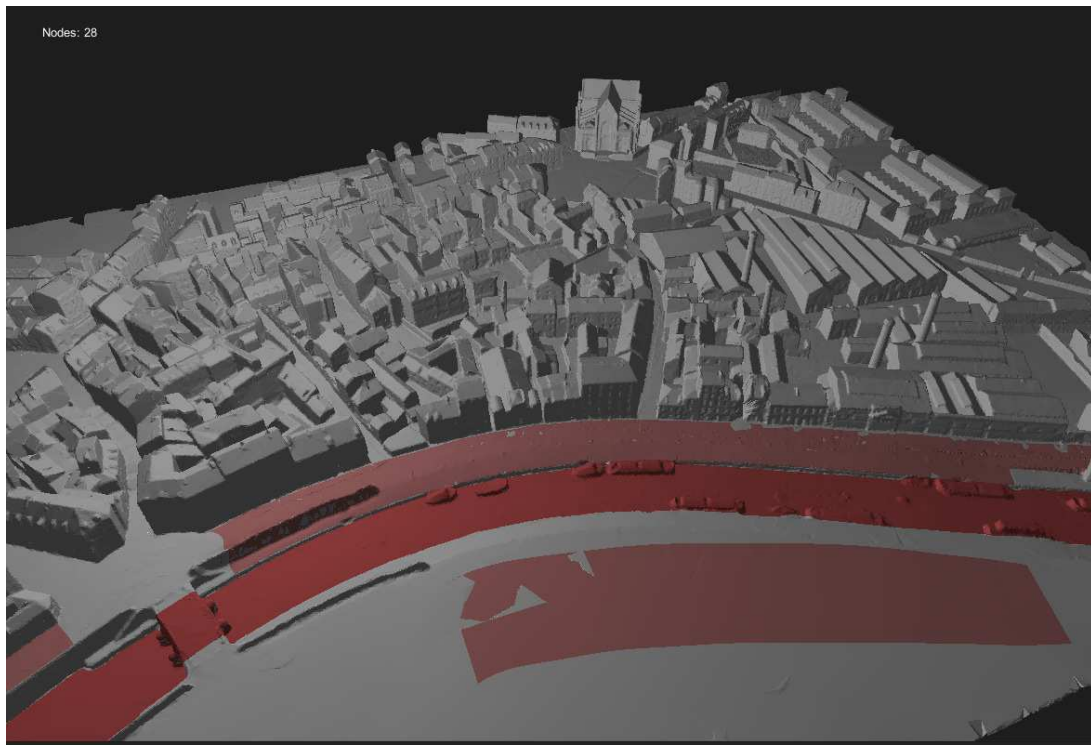


Figure 5.15 – Aperçu de la scène 3D virtuelle avec la mise en surbrillance de l'élément sélectionné et des éléments associés dans la base de données. Ce mode de représentation est en adéquation avec l'interface muséographique présentée à la section 5.2

- naviguer parmi les documents historiques numérisés (photographies, documents audiovisuels, peintures, etc.) ;
- visualiser l'évolution temporelle de l'élément quand cela est possible, par exemple au moyen de différents modèles 3D (représentations d'époques différentes, avec différents niveaux de détail).

L'utilisateur peut donc choisir d'accéder aux détails d'un élément sélectionné, de mettre en évidence les autres zones d'intérêt dans la scène, et visualiser celles qui ont une connexion avec l'élément sélectionné ou encore d'y porter une annotation (figure 5.17). Ce principe d'annotation est un des éléments essentiels pour la phase de capitalisation. En effet, la manipulation des éléments existants permet à l'utilisateur-acteur d'interpréter les informations qui lui sont proposées ou de porter un jugement.

En guise de perspective, nous envisageons une extension de la classe **annotation** à d'autres modes de saisie. En effet, la possibilité se limite ici, comme dans le système présenté au chapitre 4 à des annotations textuelles associées à des items définis par un identifiant. Cependant, ces annotations peuvent également être des « tags » permettant à l'utilisateur de situer un élément par rapport à des éléments de connaissances personnels, n'ayant de sens que pour l'utilisateur lui-même. Il est également possible d'envisager des annotations graphiques, comme l'attribution de couleurs pour la création de groupes ou le légendage de type cartographique.

Le système immersif proposé dans ce chapitre peut donc faciliter la définition des parcours décrits au chapitre 4 en permettant un contrôle visuel immédiat à l'utilisateur pour la vérification de la cohérence du système vis-à-vis des données sémantiques et physiques.

L'accès à ces informations est dépendant des connaissances accumulées au sein du système d'information. La combinaison d'informations hétérogènes peut mener à une diminution de l'efficacité et de l'ergonomie de l'interface. Par conséquent, une solution envisagée est d'utiliser des curseurs pour filtrer les informations et laisser à l'utilisateur le choix des éléments à afficher. D'autres techniques de visualisation sont possibles (gestion de l'occlusion, des niveaux de détail, des métaphores de représentation, personnalisation en fonction du profil de l'utilisateur) mais n'ont pas été testées dans le cadre de ce travail.

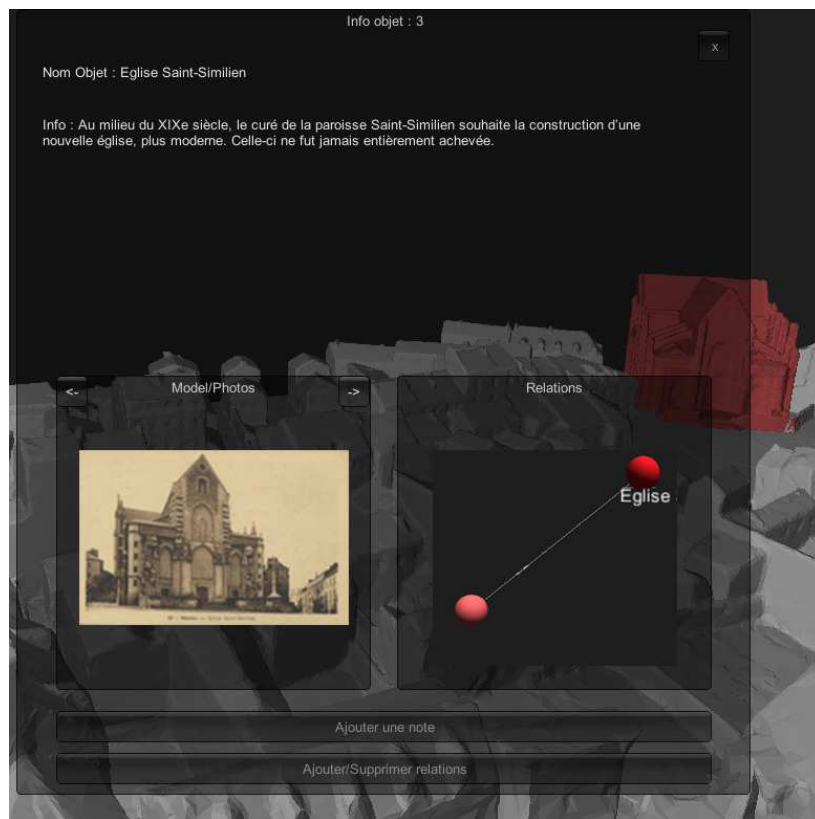


Figure 5.16 – Fenêtre permettant la consultation des informations associées à l'élément sélectionné dans la scène et présent dans la base de données.

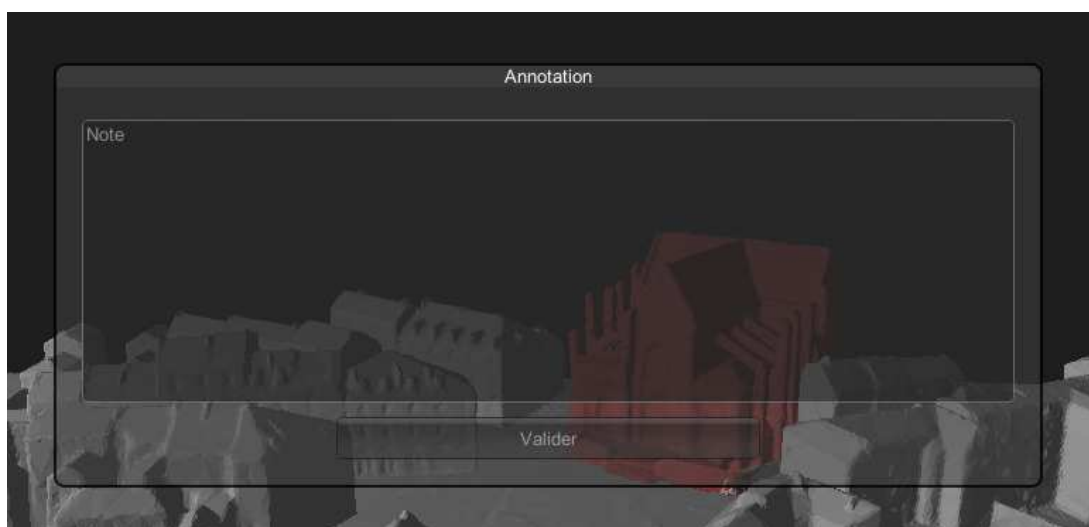


Figure 5.17 – Fenêtre de saisie d'une annotation. L'annotation est ensuite intégrée dans la base de données et associée à un utilisateur authentifié ainsi qu'à l'objet sélectionné.

5.3.6 Conclusion et perspectives

Cette proposition est un prototype pour la définition future d'un framework plus complet permettant une expérience de réalité virtuelle permettant la manipulation d'informations en vue d'une capitalisation des connaissances en contexte (avec un tracking possible du processus d'interaction employé par l'historien par exemple).

Ce mode de représentation et d'interaction permet de visualiser en temps réel les conséquences des actions de l'utilisateur sur le système. Ce type d'approche fait l'objet de recherches notamment dans le domaine de la conception en ingénierie mécanique où la visualisation de l'influence des décisions des acteurs sur le processus de conception permet de réduire de nombreux risques (incompréhension, manque de flexibilité) (Lutters *et al.*, 2014). Pour l'historien, cela permet de reconstruire le récit au fil de l'eau et de pouvoir tester certaines hypothèses comme cela se fait en archéologie (Prévôt, 2013) par la conception de prototypes physiques ou virtuels. Une autre fonctionnalité est l'ajout d'information au système par le biais direct de l'interface. Cette opportunité permet d'intégrer de manière flexible de nouvelles connaissances au système.

Par ailleurs, si ce type de système interactif apporte une aide à l'historien dans le processus d'analyse d'un corpus et de création du récit historique, les connaissances capitalisées peuvent ensuite être valorisées une fois validées auprès du public externe, par des applications touristiques par exemple.

En ce qui concerne les perspectives d'amélioration, nous avons pu en identifier un certain nombre tout au long de ce chapitre. Nous pouvons citer deux voies principales :

- l'amélioration de l'automatisation de la chaîne de production de la scène virtuelle. En effet, la réalisation du monde virtuel a nécessité un découpage manuel des différentes zones 3D d'intérêt (cf. figure 5.18) et la conversion du maillage brut dans un format de données adapté pour Unity3D⁷, ce qui réduit drastiquement les possibilités de reproductibilité efficace d'un tel outil sur d'autres objets patrimoniaux. Cependant, cette problématique rejoint la problématique technique présentée au chapitre 4 concernant la localisation automatique des éléments sur la maquette et traitée partiellement dans (Laroche *et al.*, 2012)
- la gestion de la cohérence du système lors de l'ajout d'informations : vérification des données existantes vs. données proposées pour ajout, suggestion de connexions possibles entre éléments, visualisation du pourcentage de connectivité entre un nouveau corpus de données et le corpus déjà présent, etc. Cette piste d'amélioration passe par la mise en place de traitements de l'intelligence artificielle ou de l'apprentissage automatique, ou au moyen d'indicateurs à déterminer.

D'autres perspectives résident dans l'ajout de nouvelles fonctionnalités comme l'affichage d'annotations positionnées directement dans la scène virtuelle, la manipulation des types de données présents dans le modèle conceptuel pour l'enrichissement ou la spécialisation (intégrer différents niveaux de détails géométriques) selon un point de vue particulier. Cependant, une interface de visualisation, de surcroît potentiellement immersive doit rester suffisamment simple pour garder une efficacité suffisante du point de vue de l'utilisateur. Une évaluation avec des tests utilisateurs permettrait d'affiner ces aspects et d'apporter des éléments de réponse à ces questions. Il faut d'ailleurs garder en tête que ce type d'interface doit permettre la manipulation d'un corpus documentaire hétérogène de taille sensiblement plus importante que celle du corpus relatif à la maquette du quartier Saint-Similien. En effet, le ratio entre le nombre de points d'intérêt de la maquette du quartier Saint-Similien et celle du port de Nantes est d'approximativement 20.

Une autre piste exploratoire concerne la découverte de connaissances dans les bases de données (ou *Knowledge Discovery in Databases*). Des chercheurs travaillent justement sur les avantages de supports de visualisation 2D et 3D pour la découverte de connaissances dans de larges corpus de données. En effet,

⁷Pour rappel, le modèle 3D de la maquette du quartier Saint-Similien numérisée présente environ 10 millions de triangles. Il a fallu diminuer ce nombre d'un facteur 8 pour son utilisation dans Unity3D

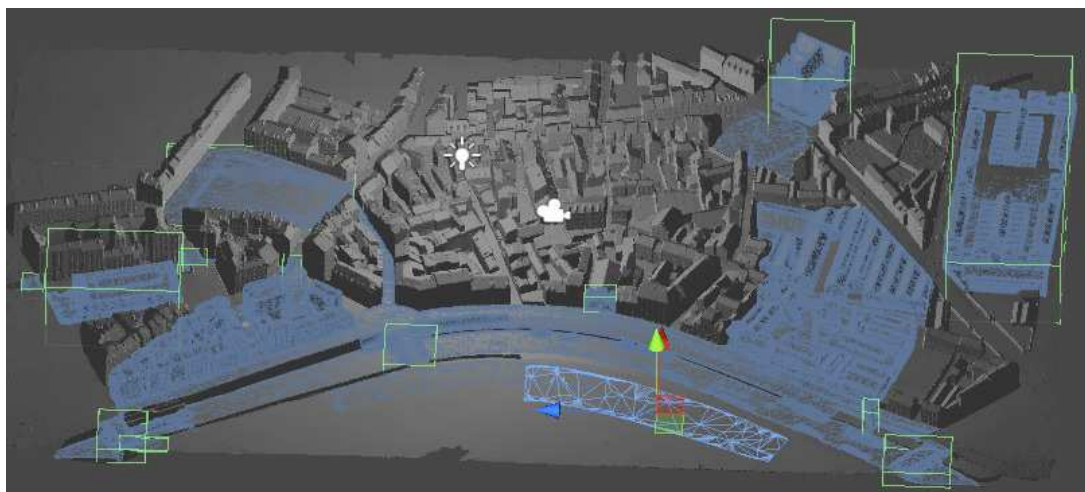


Figure 5.18 – Vue d'ensemble du modèle 3D de la maquette Saint-Similien avec les zones découpées correspondant aux entités identifiées et renseignées dans la base de données.

dans ce type de processus, l'exploration des règles établies par les algorithmes de fouille de données est une étape fastidieuse. L'utilisation de ces supports de visualisation et d'interaction permet de faciliter la définition de ces règles pour l'utilisateur (Kuntz *et al.*, 2006; Blanchard *et al.*, 2007). La combinaison de ces recherches en informatique appliquée à la fouille de données avec notre méthodologie de capitalisation des connaissances historiques pourrait être une perspective intéressante.

Finalement, à des fins de traitement informatique, ou d'alignement de modèles, il serait possible d'utiliser ce type d'interface pour assister les experts historiens dans l'alignement des données selon un standard de classification comme des ontologies formelles. Cette approche permettrait de réaliser cette tâche « en contexte » plutôt que de le faire *a priori*. Ainsi, à partir d'un corpus commun de documents, chaque utilisateur pourrait définir son cadre de travail basé sur un choix d'ontologie qui lui convient.

5.4 Conclusion

Ce chapitre a permis de décrire deux dispositifs de visualisation et d'interaction pilotés par les connaissances (formalisées au chapitre 4).

Les deux démonstrateurs ainsi proposés permettent d'apporter les derniers éléments contributif de cette thèse comme décrit par la figure 5.19.

- Le dispositif muséographique a permis de répondre à la problématique industrielle de valorisation d'un objet de collection de musée en optimisant la gestion des connaissances associées. En effet, la méthodologie proposée au chapitre 4 permet de concevoir des outils d'aide à la médiation muséographique tout en assistant la capitalisation de connaissances historiques. Les résultats d'évaluation de ce dispositif détaillés en annexe D permettant de valider l'utilité d'un tel dispositif en terme de médiation culturelle. Ces travaux de recherche appliquée ont donc abouti à la réalisation du dispositif final de valorisation de la maquette du port de Nantes en 1900 qui sera mis en place courant 2015 au musée d'histoire de Nantes.
- Le démonstrateur de réalité virtuelle a permis d'analyser les possibilités plus fines d'interaction avec les connaissances historiques intégrées au système présenté au chapitre 4. Ce système s'adresse plus particulièrement aux utilisateurs spécialisés pour la manipulation des données sémantiques et spatio-temporelles. Cette proposition a permis de dégager des pistes pour la recherche en histoire, notamment par l'étude d'hypothèses de recherche, facilitée par les outils immersifs de réalité virtuelle.

Les éléments présentés dans ce chapitre permettent donc de démontrer l'intérêt des interfaces de visualisation et d'interaction pour la compréhension et la valorisation du patrimoine. Piloter ces interfaces

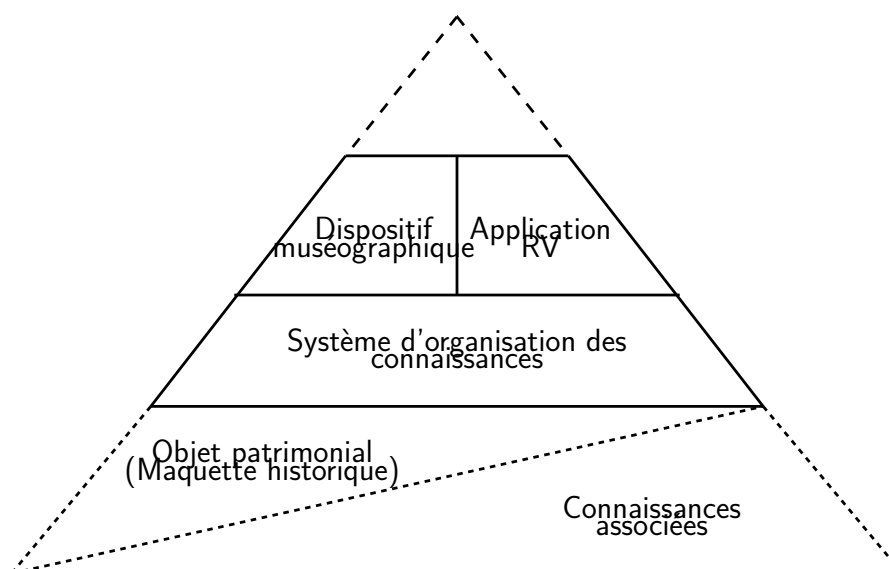


Figure 5.19 – Schéma de synthèse des travaux présentés dans cette thèse et décrivant la proposition d'un PLM muséologique couvrant les différents niveaux de la "pyramide".

par les connaissances permet d'optimiser l'interopérabilité avec les systèmes de gestion des collections du musée mais également de garantir un système global pérenne et scientifiquement viable pour la recherche en histoire. La sérendipité permise par la modélisation décrite aux chapitres 3, 4 et ces formes de représentation permettent d'apporter des éléments complémentaires aux utilisateurs-acteurs spécialisés ou non pour la recherche d'information.

Cependant, l'activité de capitalisation dans le sens de l'enrichissement du modèle par l'historien n'a pas été complètement démontré par le dispositif en réalité virtuelle. Seul l'ajout et la modification d'information dans le système a pu être démontré. Cet aspect reste donc à l'état de postulat tel que proposé dans la méthodologie décrite au chapitre 3 et sera donc ajouté comme perspective de recherche future.

Conclusion et perspective : vers un système de gestion de connaissances pour une muséologie durable

Ce chapitre revient sur les résultats de ces travaux de recherche appliquée. Nous insistons notamment sur les problématiques soulevées et les apports proposés dans cette thèse. Puis nous suggérons de nouveaux axes de travail, à la fois en recherche fondamentale mais également pour le cadre d'application muséal. Nous proposons entre autres d'analyser les apports mutuels que les SPI et SHS peuvent s'offrir.

Conclusion générale

Les travaux présentés dans ce manuscrit sont le fruit de 3 années de recherche et développement au sein d'une équipe pluridisciplinaire. Le rattachement conjoint entre un laboratoire SPI, un centre de recherche en SHS et une institution muséale a permis de donner une dimension transdisciplinaire à la méthodologie et aux outils proposés. Par ailleurs, le **cadre d'application industriel** au sein du **musée d'histoire de Nantes** a permis de démontrer l'apport de la méthodologie proposée à la muséologie. Une telle diversité des points de vue, des connaissances et des compétences est indispensable pour le bon déroulement des recherches sur des domaines aussi singuliers que le patrimoine culturel et la muséologie.

La **méthodologie proposée au chapitre 3** et **illustrée dans les chapitres 4 et 5** peut être assimilée à celle de la construction d'un puzzle. En effet, il s'agit de **reconstituer** les différents éléments relatifs à une **œuvre patrimoniale** afin :

- de pouvoir en **prouver l'authenticité** et l'intégrité ([UNESCO, 2011](#)) ;
- d'établir un **socle scientifique de connaissances** pour l'analyse et la compréhension du passé ;
- de **transmettre les connaissances** et d'en permettre l'appropriation par les générations futures en utilisant les outils technologiques et de médiation à disposition.

Ainsi les **différents publics** concernés par une œuvre seront à même d'**accéder aux pièces du puzzle** correspondant à leur intérêt, c'est-à-dire, dans le cas d'un musée, aux **objectifs scientifiques et de médiation**. Cette approche est nécessaire pour la mise en œuvre d'**interfaces de visualisation et de valorisation** adaptées à la nature des objets patrimoniaux étudiés ([Laroche et al., 2008](#); [EPOCH, 2009](#); [Collectif, 2013](#)).

La contribution de cette thèse de doctorat répond donc à plusieurs objectifs scientifiques et propose un **apport épistémologique, méthodologique et instrumental pour la muséologie et l'histoire des techniques**.

L'approche proposée fait suite aux **travaux théoriques** menés en 2007 sur l'**archéologie industrielle avancée** ((Laroche, 2007)) en y apportant une **vision opérationnelle** et une **méthodologie** englobant également la phase de **valorisation** et la **capitalisation des connaissances** produites à partir de l'utilisation des interfaces de visualisation et d'interaction. En ce sens, la présente thèse contribue à répondre aux perspectives de recherche proposées dans (Laroche, 2007) comme le décrit la figure 5.20.

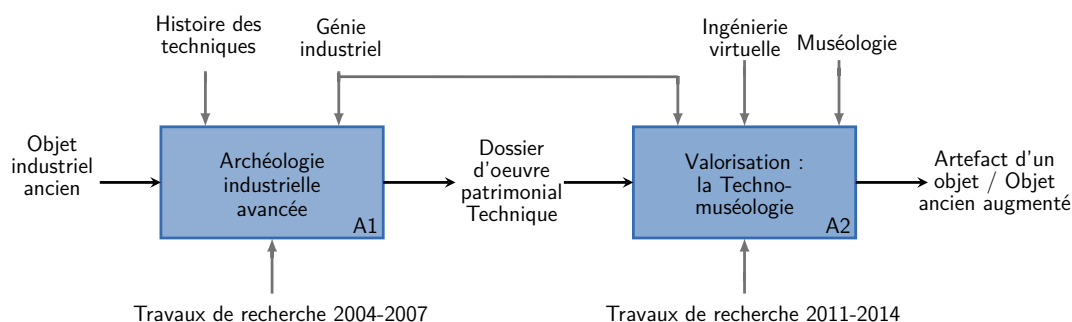


Figure 5.20 – SADT repris de (Laroche, 2007, p. 393) et complété avec les résultats de ce travail de recherche appliquée.

La particularité de ce travail réside dans la prise en compte des méthodes de travail en histoire dans un contexte muséologique. Ainsi, l'importance de l'homme dans le système nécessitait la mise en place d'une **méthodologie anthropocentrée**. D'ailleurs, un système de **gestion des connaissances** liées au patrimoine culturel doit garder une **souplesse** nécessaire tout en maintenant l'**interopérabilité des données** pour la **restitution des informations** à de **multiples niveaux** et de **multiples utilisateurs**.

Du point de vue conceptuel, nous avons vu que le **PLM** (*Product Lifecycle Management*) et les méthodes du génie industriel en général (analyse systémique, **Knowledge Management**, PLM) peuvent apporter des briques pour la structuration d'une méthodologie robuste et pérenne. Un **support méthodologique à la gestion des données liées aux objets de collection du musée** a en effet été identifié comme une **problématique industrielle forte** (voir chapitre 1).

Puis, le chapitre 2 s'intéresse aux nombreux domaines de recherche pouvant apporter des éléments de réponse à une telle problématique. L'analyse de cet état de l'art nous a amenés à poser des hypothèses sur l'intérêt d'une **approche produit-processus** basée sur la mise en place d'une méthodologie et d'un **méta-modèle conceptuel** pour supporter les activités du musée et la gestion de connaissances historiques.

La méthodologie proposée est décrite au chapitre 3. Celle-ci est basée à la fois sur une approche processus et une approche produit pour la mise en place d'un **système d'organisation des connaissances** dans le cadre d'un **PLM muséologique**. La méthodologie proposée vise non seulement à **optimiser** les processus de **gestion des données** au sein des activités du musée, mais également à apporter des **outils d'aide à la décision** utilisant des technologies numériques pour la **valorisation et la recherche en histoire**.

Enfin, le chapitre 4 décrit de manière détaillée l'**application de la méthodologie** pour la mise en œuvre d'un système de gestion des connaissances associées à un **objet patrimonial** du musée d'histoire de Nantes : **la maquette du port de Nantes en 1900**.

Le chapitre 5 vient apporter des éléments de réponse complémentaires au chapitre 4 du point de vue de la **visualisation pilotée par les connaissances** pour la validation de la méthodologie. À travers la

conception d'un **démonstrateur muséographique fonctionnel**, nous démontrons les hypothèses établies au chapitre 2 et répondons à la problématique industrielle. Le **dispositif interactif en réalité augmentée** permet d'accéder aux informations liées à un objet physique au moyen d'une interface et d'un couplage avec une projection. Ce couplage s'effectue par le biais d'un modèle 3D virtuel de la maquette à valoriser. Cette **preuve de concept** valide ainsi la valeur ajoutée d'un système de gestion des connaissances pour piloter la visualisation et valoriser les objets du patrimoine. Le niveau générique du modèle proposé permet de répondre de manière satisfaisante à la problématique industrielle, en accord avec les **tests utilisateurs** menés en collaboration avec les services du musée d'histoire de Nantes.

Le niveau générique du modèle proposé permet de répondre de manière satisfaisante à la problématique industrielle. Cependant, il reste désormais à identifier les limites de la méthodologie proposée au travers des manques identifiés du système opérationnel mis en œuvre. En effet, il s'agit désormais d'identifier et de mettre en place les modules garantissant l'interopérabilité avec un système d'information global pour le musée. Cependant, dans l'état actuel du mode de fonctionnement du musée, cette tâche demeure importante en terme de temps et de moyens. Il faudrait avant tout mener une étude systémique pour une comparaison des modèles "as is" et "to be" de l'organisation du musée. Les résultats du présent travail de recherche amènent néanmoins des éléments théoriques et tangibles pour un premier pas vers un outil PLM pour une muséologie durable. Enfin, nous faisons le postulat que ces travaux interdisciplinaires et cette méthodologie de l'histoire permettrait d'améliorer les outils et les méthodes du génie industriel notamment pour la **conception de nouveaux produits en capitalisant les connaissances sur les objets anciens**.

Perspectives de recherche

Au terme de ces trois années de recherche, les résultats obtenus amènent plusieurs perspectives de recherche pour la poursuite de cette démarche épistémologique en muséologie.

L'interdisciplinarité et ses conséquences épistémologiques pour la muséologie et le génie industriel

Propos introductif

L'ambition ici est d'analyser le rôle d'un tel traitement des informations dans la construction d'un savoir commun entre le domaine scientifique des ingénieurs et la connaissance empirique d'une telle expérimentation appliquée d'un point de vue de la valorisation muséographique. L'intention est d'entraîner dans cette démarche analytique les enseignants-chercheurs et les étudiants dans les domaines des sciences humaines et des sciences de l'ingénieur, et aussi les professionnels du patrimoine et de la valorisation muséographique. Il s'agit donc d'identifier et d'analyser les modalités spécifiques et complexes des transferts et des constructions de représentations communes entre la communauté scientifique des ingénieurs, des historiens et des professionnels en muséographie. Le réseau complexe élaboré dans le cas de ce projet constitue un cadre privilégié pour étudier les relations complexes entre science – technique, du point de vue du rôle des méthodes, des connaissances formelles et des pratiques expérimentales, mais aussi des modèles et des outils utilisés chez les techniciens et les ingénieurs.

Une des questions restant en suspens malgré les nombreux éléments de réponse apportés par notre proposition consiste à étudier quelle méthodologie mettre en œuvre pour assister l'historien dans sa création du récit historique à partir d'un objet patrimonial ?

Le projet de « Nantes1900 » est marqué par un caractère très empirique, du fait de la démarche utilisée elle-même et ses limites et en raison de son double statut. Ce projet de valorisation est, en effet, un objet d'étude tout en étant un outil. C'est un objet d'étude en lui-même, c'est-à-dire une expérimentation en tant que telle ; il s'agit, on l'a vu, d'une étude de capitalisation des connaissances en histoire des techniques et du patrimoine industriel, mais aussi de valorisation de la recherche au point de vue scientifique et muséographique, au moyen de la modélisation numérique. Par sa réalisation, ce projet de valorisation d'un

objet patrimonial et muséographique au moyen d'un traitement numérique devient simultanément un outil de cette recherche. Ainsi à terme, ce cas d'étude permettra de valider les méthodes développées au sein de ce projet pluridisciplinaire.

Une des particularités du projet de Nantes1900 est donc liée à sa grande interdisciplinarité, qui s'impose à double titre dans le projet. Depuis le début du projet il n'y a pas seulement un vieil objet âgé de plus de 100 ans : c'est plus de 100 personnes mobilisées. Étudiants, enseignants, chercheurs et professionnels ont été et sont encore au travail pour cette étude. Le projet « Nantes 1900 » exige plusieurs domaines d'excellence. Chacun apporte les méthodes et les pratiques de son expertise et de sa connaissance spécifique. C'est la base de l'interdisciplinarité. L'interdisciplinarité mène à comparer les différentes méthodologies des disciplines impliquées. La plupart du temps les processus sont différents. Cette transdisciplinarité crée une synergie bénéfique et indispensable pour réussir le projet.

En résumé, l'interdisciplinarité s'impose donc à double titre dans ce projet :

- en tant qu'objet. Le projet mobilise des chercheurs et des professionnels de domaines d'expertise suffisamment distincts (en raison des objectifs considérés, des méthodes de travail, du vocabulaire...), pour que la mise en œuvre de l'interdisciplinarité constitue le fond même du projet. Il est donc nécessaire d'identifier et d'analyser les modalités de l'interdisciplinarité et de transversalité qui exercent une fonction fondamentale dans la structuration de l'ensemble des méthodes développées au sein de ce projet pluridisciplinaire.
- en tant qu'outil. L'aspect novateur d'un tel projet pluridisciplinaire (tant dans la démarche globale que dans les résultats obtenus) constitue l'une des principales particularités. Il a en effet pour ambition d'entraîner dans cette démarche analytique les enseignants, les chercheurs et les étudiants en sciences de l'ingénieur aux côtés des sciences humaines et sociales, des professionnels des musées et de la valorisation du patrimoine scientifique et technique.

Une nouvelle façon d'écrire l'histoire...

Les résultats mentionnés dans ce manuscrit mettent en lumière un constat déjà identifié dans le monde du patrimoine culturel : les outils numériques permettent de faire évoluer les corpus historiques vers de nouveaux systèmes dynamiques, facilitant la compréhension du passé et l'appropriation du patrimoine par tout un chacun.

Francis Chateauraynaud et Josquin Debaz⁸ insistent d'ailleurs sur l'influence du web vis-à-vis de cette évolution. Selon eux, un web socio-historique, basé sur les concepts issus du web socio-sémantique pour tenir compte des spécificités liées aux connaissances historiques, collectives par essence : l'incertitude des informations et la complexité des temporalités. Cette complexité, liée à l'imbrication de multiples cycles de vie d'objets nécessaires à la restitution du contexte d'un objet du patrimoine, a déjà été abordée dans ce manuscrit. Mais la temporalité des acteurs interagissant avec le patrimoine est également à prendre en compte : la temporalité de l'historien, du visiteur de musée, du témoin d'époque, etc.

Michel Serres dans « Petite poucette »⁹ mentionne d'ailleurs le comportement des jeunes, évoluant vis-à-vis de la société et notamment des outils numériques. Selon l'auteur, nous passons progressivement d'une société du spectacle à une société de l'information, modifiant ainsi les jeux de pouvoir liés à la connaissance. Nous pouvons ainsi faire le lien avec nos travaux, permettant à de multiples acteurs de construire ensemble un savoir lié à notre mémoire et notre passé commun.

Cette nouvelle façon d'écrire l'histoire mérite davantage de phases exploratoires via d'autres cas d'études et de retours d'expérience pour affiner les méthodes et modèles proposés ici.

⁸Source : <http://socioargu.hypotheses.org/83>

⁹Référence : Michel Serres. *Petite Poucette*. Éditions le Pommier, 2012. 82 p.

De concevoir les objets industriels. . .

Si l'approche proposée donne de nouvelles méthodes complémentaires aux méthodes classiques de l'histoire pour écrire l'histoire, elle n'en reste pas moins source de problématiques possibles pour le génie industriel.

En effet, le rétro-processus de capitalisation des connaissances et de conception des objets patrimoniaux amène les ingénieurs à questionner les outils et méthodes actuelles du génie industriel. Nous pensons en effet que la démarche de l'historien et des sciences humaines en général pourrait être bénéfique aux systèmes industriels, trop peu souvent centrés sur l'homme.

Parmi les hypothèses de recherche à tester dans le futur, on peut citer :

- la prise en compte de cette phase de patrimonialisation dans la phase EOL (End Of Life) du cycle de vie lors de la conception d'artefacts. Il s'agit par exemple d'anticiper l'éventuelle vie muséologique d'une œuvre (au sens de l'appropriation d'un objet patrimonial par les générations futures) dans la capitalisation des données techniques, des intentions, savoir-faire, etc. Cela permettrait d'optimiser le passage de témoin intergénérationnel ;
- l'utilisation des connaissances anciennes pour des approches innovantes en conception. Nous avons vu en effet que la patrimonialisation d'objets anciens permet de capitaliser du savoir ou savoir-faire oublié. L'application de la méthodologie de patrimonialisation proposée pourrait permettre ainsi non seulement de valoriser des archives, mais également de les capitaliser pour la recherche de solutions techniques innovantes à des problèmes contemporains ;
- le pilotage des outils de CAO par les connaissances plutôt que par les données physiques. Il s'agit ici d'étudier les possibilités offertes par les dispositifs décrits au chapitre 5 pour la gestion des données produits en général, et notamment le pilotage des maquettes numériques. La maquette numérique pourrait donc être manipulée et modifiée par les concepts de l'utilisateur.

L'impact de ce mode de fonctionnement sur les méthodes du génie industriel reste donc à explorer et évaluer.

Pour préparer l'avenir

Une autre perspective est de s'appuyer sur cette méthodologie pour se diriger vers une grille de lecture du patrimoine (cf. préconisations de l'UNESCO). Par la mise en place d'indicateurs et l'utilisation d'outils d'analyse multi-critères, une telle grille de lecture permettrait de valider ou d'invalidier les critères d'authenticité et d'intégrité d'une œuvre. À partir des données et connaissances mises en relation, un des objectifs pourrait s'orienter vers la conception d'outils d'aide à la décision pour l'identification, la conservation et la valorisation du patrimoine culturel.

En effet, les critères de décision pour la mise en place d'un projet de conservation et/ou de valorisation sont nombreux et difficilement identifiables pour les acteurs décisionnels. Technologies disponibles, nature et forme de l'objet, objectifs de médiation, compétences mobilisables, informations accessibles, telles sont les contraintes à prendre en compte pour le choix d'une solution adaptée au projet.

Enfin, d'un point de vue industriel, la capitalisation des savoirs et savoir-faire est un enjeu crucial dans la course à l'adaptation pour les entreprises. Les besoins, les outils, les hommes évoluent sans cesse et les processus doivent être remodelés en fonction de ces évolutions. Anticiper cette nouvelle phase patrimoniale du cycle de vie des objets dès leur conception permettrait d'optimiser la réutilisation des connaissances et ainsi devenir une source d'innovation et de durabilité pour les entreprises de demain. Une nouvelle thèse est d'ailleurs prévue sur le thème de la personnalisation de masse du patrimoine numérique afin de tenter de résoudre la problématique de la numérisation de masse des artefacts. D'un point de vue social, la connaissance des solutions ayant existé et des erreurs du passé ne pourra qu'améliorer le fonctionnement du monde d'aujourd'hui.

Perspectives conceptuelles et technologiques

Perspectives conceptuelles

Nous l'avons vu, le processus décrit au chapitre 3 et illustré pour partie aux chapitres 4 et 5 permet d'initialiser le système à son état n_0 . Une fois initialisé, le système doit être extensible en permettant à différents contributeurs d'intégrer de nouvelles connaissances. Pour cela, nous faisons l'hypothèse que cette intégration peut être assistée par le biais d'interfaces adaptées aux différents utilisateurs potentiels du système.

Il faut notamment que le système puisse être enrichi par de nouvelles phases de recherches menées par les historiens. Un outil d'aide à l'intégration, en assistant l'expert dans la saisie de ses données par exemple, au moyen d'inférences ou de métaphores de visualisation appropriées, permettrait de rendre le système plus performant et robuste. Cette étape est cependant difficile à mettre en place car elle nécessite l'introduction d'indicateurs personnalisés selon les utilisateurs. Une piste pourrait résider dans l'implémentation d'algorithmes de fouille de données pour identifier parmi les connaissances candidates à l'intégration dans le système, celles qui peuvent faire pour partie référence à des éléments déjà présents dans l'espace des connaissances déjà créé. Ce type de procédure permettrait de faciliter l'intégration de nouvelles connaissances en identifiant les articulations possibles avec les connaissances existantes.

Il s'agit donc d'une perspective de recherche intéressante, qui fait l'objet d'une nouvelle thèse de doctorat présentée précédemment sur la question de la personnalisation de masse du patrimoine. En effet, chaque objet étant différent, il faudra prendre en compte différents contextes liés aux hypothèses de recherche historique pour enrichir et faire évoluer le méta-modèle présentés dans ce manuscrit.

Une autre piste d'amélioration est liée à l'annotation des documents numérisés issus des sources historiques. En effet, il est fréquent qu'une carte ancienne, un plan, ou un schéma technique se voit annoté de sorte à expliciter les connaissances de l'historien. Dans le système proposé, cette possibilité s'effectue par la création d'un nouveau document annoté qui se voit attribuer de nouvelles métadonnées et parodonnées. Cependant, un outil d'annotation intégré comme pour les fiches permettrait de faciliter cette tâche.

Par ailleurs, une étude supplémentaire de ce réseau pourrait permettre d'identifier des chemins au sein du graphe, et les apparenter à des « parcours » historique de manière automatique ou semi-automatique (sous contrôle de l'expert historien). Par exemple il semble possible, au vu du graphe formé, d'identifier des chemins correspondant à des flux de matière (transport de marchandises) pouvant ensuite être étudiés plus en détail. **Il s'agit là d'une piste pour identifier des « schèmes », illustrant le contexte de fonctionnement du port à l'époque, de manière induite.**

En ce qui concerne la performance de cette approche, il pourra être intéressant à l'avenir d'affiner les liens avec les différents critères présentés au chapitre 2, notamment liés aux chartes et document de référence (UNESCO, ICOMOS, Charte de Londres). En effet, nous faisons le postulat que les travaux proposés ici, ajoutés à ceux de Florent Laroche permettent de poser les bases vers une grille de lecture du patrimoine, déjà mentionnée plus haut, et qui pourrait assister les experts du patrimoine. La méthodologie et la proposition de méta-modèle introduites dans ce manuscrit pourront permettre de quantifier ou au moins de qualifier les différents critères, notamment pour juger de l'authenticité d'une oeuvre.

Perspectives technologiques

La possibilité de gérer le contenu par l'équipe du musée sur le long terme doit également être possible. Outre le processus classique d'intégration-modération-validation intégré dans l'interface de saisie, la question même de l'appropriation par le grand public est à définir. Il s'agit là d'une procédure dont les conséquences sont encore à évaluer : la collecte virtuelle de contenus. En effet, si la collecte d'objets auprès de particuliers est une activité couramment mise en œuvre dans le cadre des différentes expositions temporaires réalisées par les équipes du musée, la collecte virtuelle de documents n'a encore jamais été envisagée. Cela pose entre autres choses la question de la licence selon laquelle tout contributeur pourra proposer les contenus

dont il est le détenteur, lesquels contenus pourront ensuite être diffusés via les différentes interfaces d'accès.

Enfin, le système et la méthodologie proposés sont conçus pour anticiper de nouvelles phases de capitalisation des connaissances sur d'autres objets de la collection du musée.

Perspectives industrielles

D'un point de vue industriel, nombreuses sont les perspectives de recherche à explorer. En effet, ces 3 années n'ont pas permis de solutionner toutes les questions en suspens, et ont parfois ouvert la porte à de nouvelles questions.

Premièrement, l'approche proposée, bien qu'elle ait été appliquée à deux objets patrimoniaux, devrait pouvoir être réutilisée pour les autres objets du musée, formalisant ainsi les liens existants entre les œuvres, par leur nature ou leur contexte. De futurs cas d'applications sont ainsi prévus, notamment d'autres maquettes du musée (la maquette de l'usine LU par exemple), et la méthodologie également adaptée pour la mise en place des nouvelles bornes de diffusion des contenus au sein du parcours muséographique. L'objectif étant de dissocier la forme du contenu et de pouvoir plus facilement adapter les contenus aux formes de médiation comme le *Kjing*¹⁰.

Deuxièmement, une perspective importante consiste à exploiter la méthodologie pour prolonger la visite hors les murs du musée (*ex situ*). Cela permet de créer de nouvelles expériences de visites mêlant le virtuel et le réel par la mise en place de dispositifs *in vivo* comme le décrit DUBÉ dans (Dubé, 1995). D'un point de vue pratique, cela consiste par exemple à réutiliser les informations de la base de données constituée au chapitre 4 au sein d'une application mobile géolocalisée par exemple, utilisant ou non la réalité augmentée ou la réalité virtuelle. Ce type d'application peut aussi bien être à vocation touristique qu'à destination de décideurs pour l'urbanisme par exemple. L'objectif souhaité ici est de démontrer l'universalité de la méthode : comprendre le passé pour préparer le futur.

Troisièmement, il semble intéressant au vu de l'état actuel du système proposé d'approfondir la question de l'aide à la décision pour l'analyse des sources historiques. Cela passe par l'étude bibliographique et la mise en place de règles, d'inférences ou de systèmes de *tracking* permettant de mieux comprendre les processus cognitifs effectués lors de la démarche de recherche en histoire. Il s'agira alors d'étudier la réponse du système à l'ajout ou la modification des données, et donc d'estimer le niveau de compréhension du système et d'aide à la décision pour l'expert. Un système de suggestion basé sur des processus automatisés de découverte d'informations permettrait également de proposer une visualisation adaptée au contexte de recherche de l'utilisateur. Ce mode d'interaction se rapproche des problématiques industrielles liées à l'assistance en contexte des opérateurs par l'intermédiaire d'outils virtuels.

Enfin, la question de l'interopérabilité avec un système global de gestion des données du musée reste à approfondir. Ceci permettrait de valider l'accès multi-métiers à l'information et d'optimiser les processus d'indexation des contenus identifiés au chapitre 1. D'ailleurs, le système proposé ouvre la voie à de nouvelles activités pour les professionnels du musée, notamment les questions de la collecte virtuelle (c'est-à-dire la gestion des contributions de collaborateurs externes), de l'accès sur le web et des possibilités d'organisation des connaissances par d'autres communautés (folksonomies), de l'open data, ou encore de la visibilité des collections (accès via Europeana, etc.). C'est donc une première étape vers la définition d'un PLM muséologique.

¹⁰Kjing est un outil développé par le centre Erasme (www.erasme.org) et destiné aux médiateurs de musée permettant de manipuler des contenus multimédia sur différents supports : www.erasme.org/k-jing.

Annexe A

Analyse systémique du musée d'histoire de Nantes

Activité	Fonctionnement	Evolution
Acquérir, conserver, rechercher, communiquer et exposer le patrimoine et son environnement	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Maintenance technique ▪ gestion moyens humains ▪ gestion du budget ▪ garantie de l'accessibilité ▪ sécurité du site 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Politique de communication ▪ nouveaux projets ▪ programmation artistique
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Salariés ▪ Particuliers (dons) ▪ Organismes et institutions partenaires ▪ Site internet ▪ Photothèque ▪ Système de gestion des collections 	Logistique	Charte graphique
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Administrateurs de la BDD ▪ Chargés de projet 		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Chargé du développement scientifique ▪ Chargé de la politique des publics ▪ Conseil scientifique ▪ Direction ▪ Chefs de service

Table A.1 – Analyse systémique globale du musée d'histoire de Nantes avec la matrice SAGACE

Annexe B

Synthèse du Digital Heritage Reference Model

Cette annexe a pour but de détailler le modèle DHRM sur lequel nous nous appuyons tant pour l'approche méthodologique que pour la définition du modèle conceptuel proposé au chapitre 3.

La synthèse qui suit s'appuie sur le chapitre 5 de ([Laroche, 2007](#), pp 205-263) pour décrire le DHRM.

Le modèle d'usage des objets techniques anciens est plus complexe que celui des produits industriels contemporains pour deux raisons principales :

- Une étude patrimoniale doit rendre compte de toute la complexité du cycle de vie d'un objet patrimonial
- Les études historiques prennent en compte un corpus de connaissances plus large que celui utilisé en *Knowledge Management* des entreprises contemporaines. L'étude d'un objet technique ancien allie capitalisation des connaissances produits, processus, métiers, entreprises, sociétales et économiques. Il s'en suit une typologie structurante complexe de l'objet technique, de ses contextes et de ses vies en usage.

S'il est possible d'établir des correspondances avec des modèles produit-processus des systèmes d'information d'entreprise, l'analyse historique rétrospective implique des différences dans la structuration et la manipulation des connaissances associées aux objets patrimoniaux. La lecture d'un objet patrimonial impose par exemple des allers-retours constants entre différentes temporalités et différentes dimensionnalités comme illustré par le cas d'étude de la machine à laver le sel de Batz-sur-mer ([Laroche, 2007](#), p. 265) ou encore le cas du port de Nantes en 1900 illustré dans ce manuscrit.

Le modèle comportemental de l'objet dans son usage passé est décrit par deux aspects (cf. figure [B.1](#)) :

- l'aspect internaliste décrivant le niveau proche objet,
- l'aspect externaliste décrivant l'objet dans son environnement large.

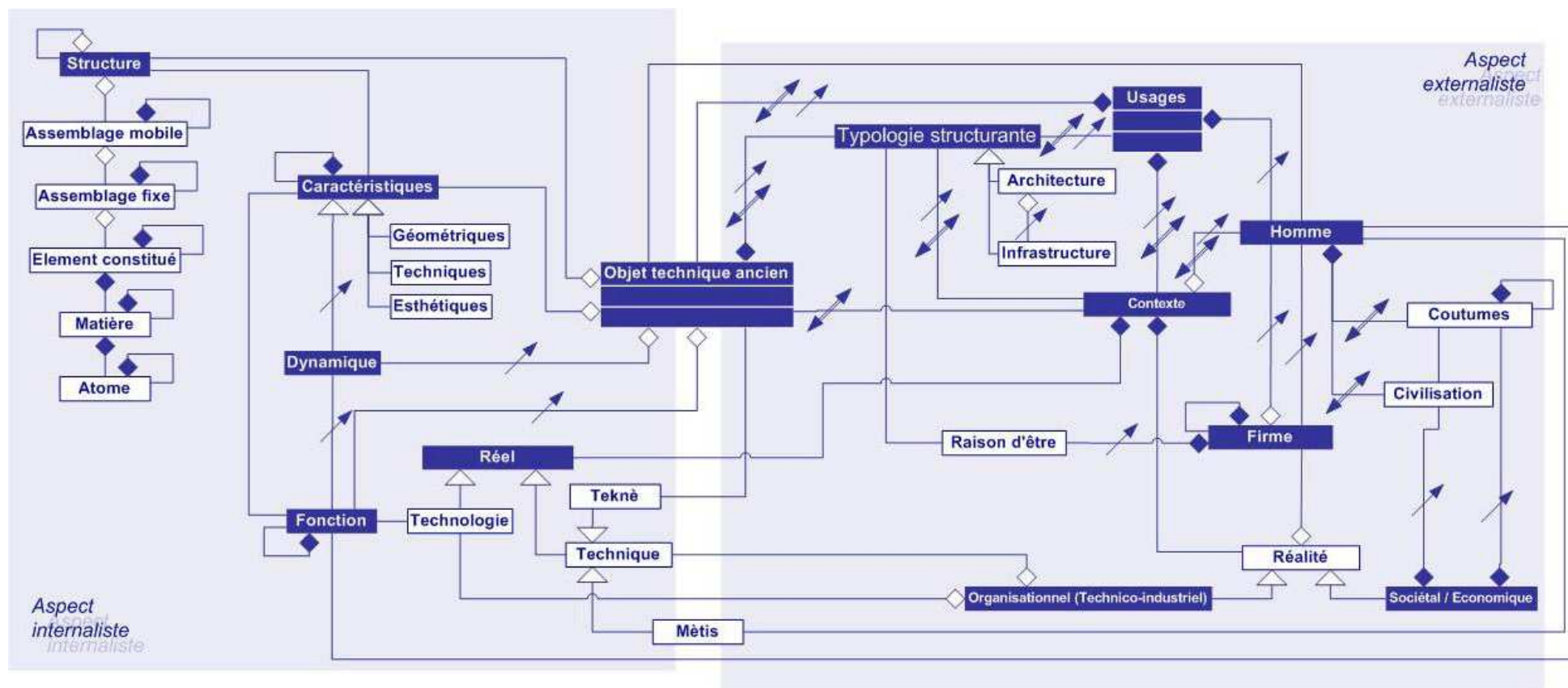


Figure B.1 – Description de l'objet patrimonial selon les vues internalistes et externalistes (Laroche, 2007, p. 255)

Pour chacune de ces vues, les différentes classes d'objets manipulées présentent deux caractéristiques inhérentes à la nature des objets patrimoniaux :

- la temporalité (temps long, temps moyen, temps court) : la mesure du temps d'exécution d'une fonction, la période de temps d'utilisation, le temps nécessaire à la fabrication, le temps de vie...
- les différentes dimensions à prendre en compte : la structure interne de l'objet, l'organisation de l'entreprise, les différents niveaux contextuels (socio-économiques, technologiques)...

La notion de schème est alors introduite pour qualifier les différents usages liant l'homme, l'objet et l'environnement, et ce, selon différentes dimensions et différentes temporalités. Le schème est donc défini comme : "l'ossature générale infrastructurelle, architecturale et temporelle de la description d'une chose, d'un objet, d'un processus..." ce qui permet de décrire l'objet (technique) ancien selon différentes échelles.

Cette notion permet de manière théorique et une fois l'espace des schèmes constitué de retrouver la globalité des conditions d'authenticité du patrimoine spécifiées par l'UNESCO (UNESCO, 2011) :

- forme et conception,
- matériaux et substance,
- usage et fonction,
- traditions, techniques et systèmes de gestion,
- situation et cadre,
- langue et autres formes de patrimoine immatériel,
- esprit et impression,
- autres facteurs internes et externes.

Le schème peut donc structurer les connaissances associées à l'objet patrimonial en rassemblant les traces relatives à l'objet étudié.

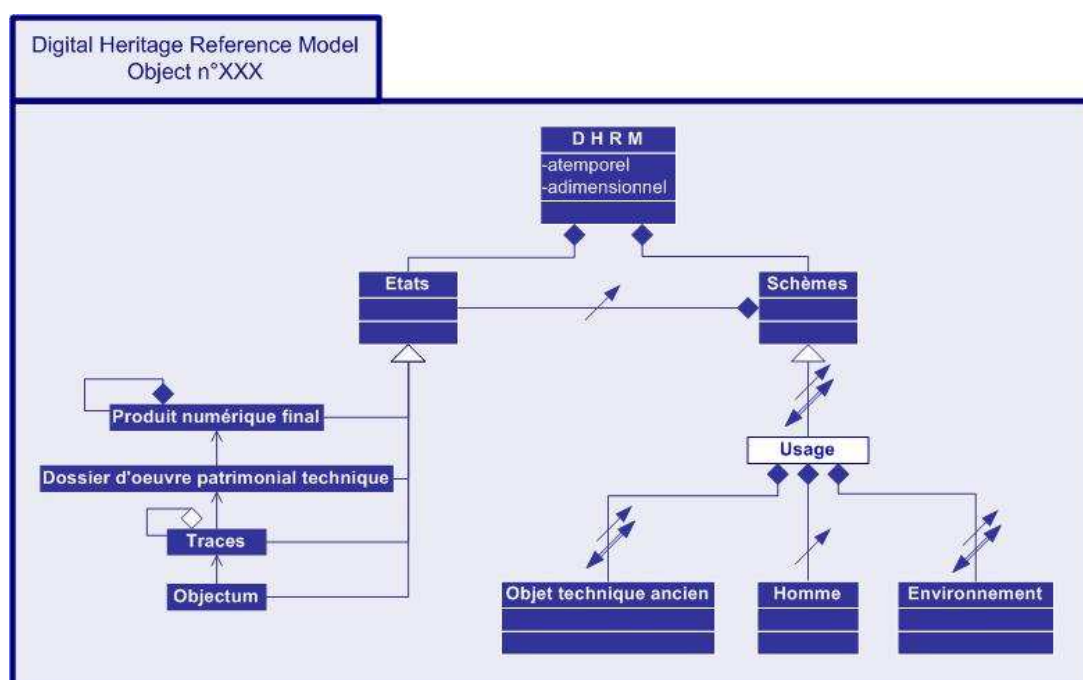


Figure B.2 – Le méta-modèle du DHRM (Laroche, 2007, p. 260)

Le processus de patrimonialisation permet alors de concevoir le nouvel état intermédiaire de l'objet technique ancien (cf. état B de la figure 3.3 du chapitre 3) : le Dossier d'Oeuvre Patrimonial Technique. Puis, cet état intermédiaire peut ensuite être discrétisé selon différentes finalités (par exemple la valorisation

muséographique). C'est ce processus que nous proposons d'enrichir tout en démontrant la faisabilité opérationnelle autour d'un cas d'étude muséal.

Ces deux étapes de transformations sont guidées par un méta-modèle conceptuel (cf. figure B.2) de données. Le système d'information utilisé pour gérer la sémantique des états et de l'objet technique ancien est appelé le Digital Heritage Reference Model ou DHRM.

Le DHRM permet la projection de la variation des états intermédiaires de l'objet technique ancien dans un espace multi-dimensionnel et multi-temporel du processus de patrimonialisation. Le DHRM est alors considéré comme atemporel et adimensionnel.

Il faut noter que la proposition théorique de Florent Laroche permet non seulement de réaliser des projections dans le passé des objets patrimoniaux mais également d'envisager les usages de l'objet dans le futur. Cette singularité peut donc permettre de s'appuyer sur le DHRM pour la conception de nouveaux objets.

De plus, les outils utilisés lors de la phase d'archéologie industrielle avancée ou lors de la phase de valorisation peuvent également devenir des objets techniques nouveaux. Une nouvelle phase capitalisation peut alors débiter. Enfin, il est important de souligner les outils utilisés lors de l'acquisition ou de la valorisation peuvent à leur tour être capitalisés de même que les nouvelles connaissances qui en découlent. Cette phase de capitalisation peut être illustrée par la figure B.3 selon deux axes ne possédant pas de sens de lecture préférentiel :

- Aspect multi-dimensionnel : de l'infrastructure vers l'architecture ou de l'architecture vers l'infrastructure,
- Aspect multi-temporel : du passé vers le futur ou du futur vers le passé.

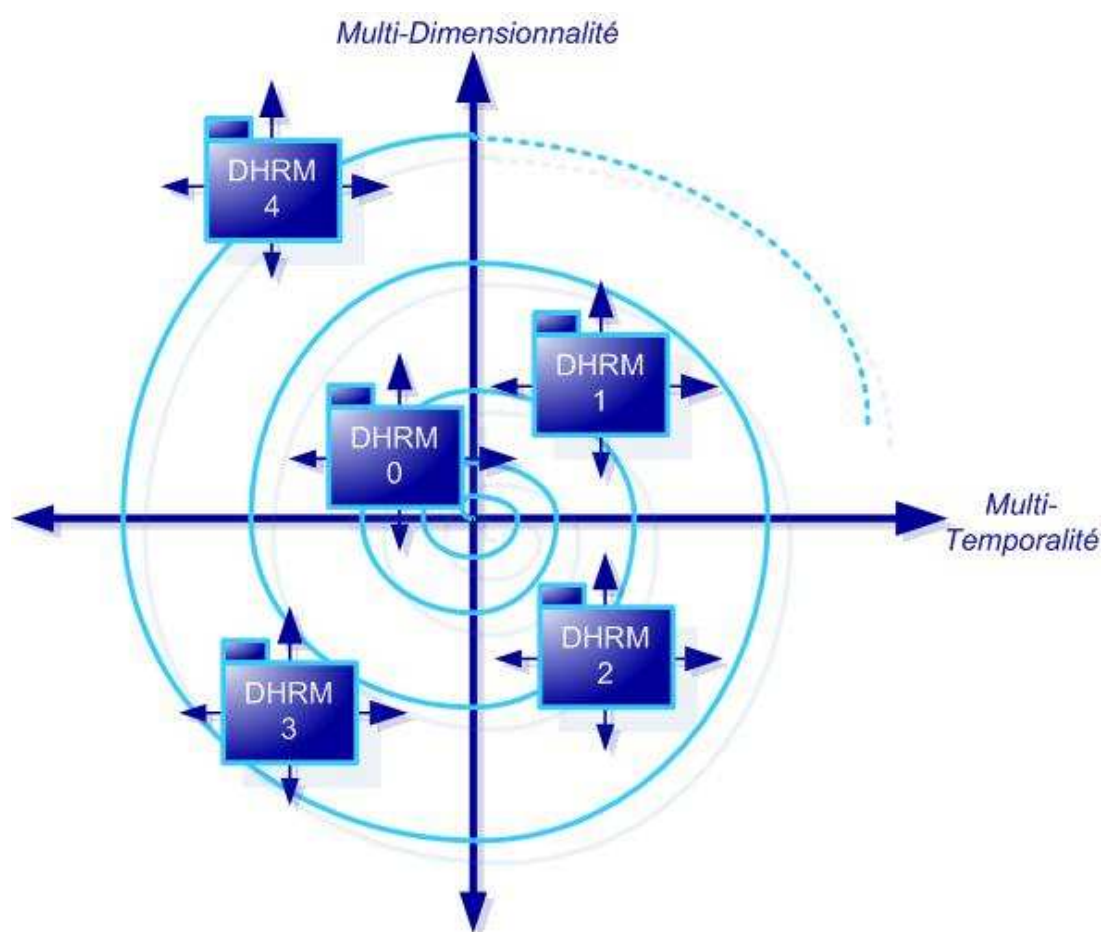


Figure B.3 – La spirale patrimoniale (Laroche, 2007, p. 263)

Annexe C

Vue tabulaire des étapes du processus de patrimonialisation

La méthodologie proposée dans ce chapitre 3 comporte de nombreuses étapes. Le tableau C.1 récapitule les différentes étapes mentionnées pour la mise en place du framework de gestion des connaissances pour la muséologie. Les éléments caractéristiques de chaque étape (données d'entrée et de sortie, acteurs) y sont détaillés ainsi que l'aspect automatique ou non de la tâche dans le cadre de ce travail.

Table C.1 – Tableau récapitulatif des (méta-)tâches à mettre en œuvre pour la patrimonialisation d'un objet d'un point de vue de la gestion de projet

Tâche	Ressources	Données d'entrée	Données de sortie	Automatisation
1. Pré-requis : identification du périmètre initial de l'étude	NA	NA	Comité de pilotage pluridisciplinaire	NA
2. Constitution du corpus	Périmètre d'étude	Liste de références documentaires et de sources pertinentes	Historiens et conservateurs du patrimoine	Manuelle ou semi-automatique si base de données existante
3. Numérisation des traces existantes	Documents 2D et artefacts 3D	Documents numériques (PDF) et fichiers CAO (STL)	Ingénieurs et régisseur des œuvres	Dépendant des objets, semi-automatique
4. Post-traitement et reconception	Documents numérisés 2D et 3D	Fichiers numériques 2D et 3D traités/créés (modélisation "from scratch")	Ingénieurs, informaticiens et historiens pour la validation	Manuelle pour la modélisation, Semi-automatique pour le traitement (dépendant de l'efficacité des algorithmes)
5. Création des éléments de connaissance	Corpus documentaire numérisé	Fiches « connaissances »	Historiens et conservateurs	Manuelle

6. Constitution du système de gestion	Définition du besoin et systèmes existants	Base de données	Ingénieurs, informaticiens, historiens et conservateurs	Semi-automatique selon le système choisi
7. Traitement des données	Données sémantiques et structurelles	Données physiques et conceptuelles reliées	Informaticiens	Automatique par morceaux
8. Association des données conceptuelles et physiques	Données informatisées	Mondes virtuels et réels connectés	Ingénieurs et historiens	Semi-automatique selon l'avancée dans le développement des algorithmes
9. Conception d'une IHM de visualisation	Ensemble de données et connaissances plus définition du besoin	Interface d'accès et de visualisation	Informaticiens, ingénieurs, professionnels du domaine et public visé	Semi-automatique
10. Intégration de nouvelles données	Système existant	Système mis à jour	Tout détenteur de connaissance	Manuelle assistée par ordinateur

Annexe D

Évaluation qualitative menée sur le prototype dans le cadre du projet « Nantes 1900 »

Laurence D'haene et Benjamin Hervy, août 2013

Les deux premières évaluations ont été menées avec un public de professionnels, sous forme d'observations complétées par des entretiens autour du prototype réalisé dans le cadre du projet. Il s'agit d'un dispositif conçu autour d'une maquette historique plus petite, qui représente un quartier de Nantes, le quartier Saint-Similien. Les professionnels ont pu consulter la base de données et naviguer via une interface conçue à cet effet pour obtenir des contenus historiques et géographiques relatifs au territoire représenté par la maquette. Ce prototype a d'abord été exposé au SIMESITEM, le salon des musées et des lieux de culture réservé aux professionnels, en janvier 2013, puis le 6 juin au château pour le personnel du musée¹.

Pour compléter cette première phase d'évaluation, nous avons installé, le 25 août dernier, le prototype dans le parcours permanent du musée, en salle 21. Un petit panneau indiquait aux visiteurs que c'était une présentation provisoire. Le choix de cette salle n'est pas sans importance, car c'est là qu'est exposée la *maquette du port en 1900*. Au cours de l'évaluation, qui a duré quatre heures et demie, 262 visiteurs ont découvert le musée d'histoire de Nantes. Les données géographiques recueillies grâce au logiciel de billetterie nous indiquent que 66 % d'entre eux étaient des touristes². Ils visitaient donc pour la première fois le musée et avaient pour la plupart une connaissance limitée de la ville. Nous avons pu observer les 80 visiteurs ayant utilisé le prototype ou s'étant approchés pour le regarder.

Les objectifs de ces évaluations étaient :

¹Le jeudi 6 juin, 19 observations ont pu être faites avec le personnel du château.

²Les visiteurs nationaux hors Loire-Atlantique représentaient cet après-midi-là 43 % et les visiteurs étrangers 23 % (majoritairement des Européens)

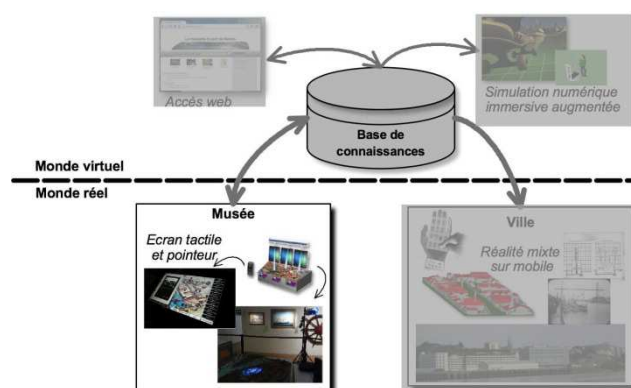


Figure D.1 – Architecture du projet global (les interactions grisées ne font pas partie de l'évaluation)

- de tester la fiabilité du prototype et de le déboguer,
- d'observer les utilisateurs dans la manipulation du prototype,
- d'observer quelles informations sont consultées et par quels profils de visiteur,
- enfin d'analyser quelle était la réception de ce nouveau dispositif de médiation.

La synthèse présentée ici s'appuie essentiellement sur les observations faites lors de la dernière journée d'évaluation. À cette étape du projet, il est en effet essentiel de confronter les hypothèses de travail avec la réalité du terrain pour :

- valider les modes de navigation et de manipulation des données qui seront proposés dans le dispositif muséographique final,
- tester le rendu des informations auprès du public,
- vérifier l'aspect collaboratif du dispositif.

La manipulation de l'outil et la sociabilité

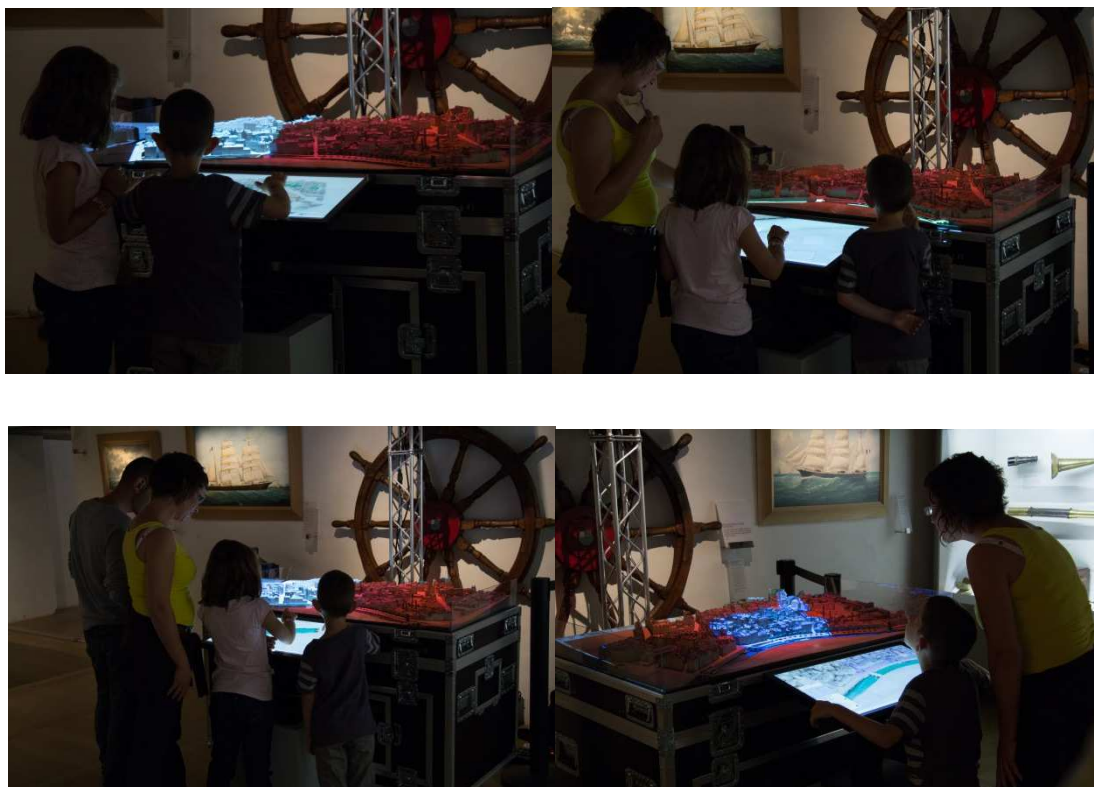
Première remarque, une quinzaine de visiteurs se sont approchés du prototype, l'ont observé quelques instants sans toucher l'écran tactile multipoints et sont repartis. Parmi ces personnes, nous avons des visiteurs habitués des musées, qui ont complètement intégré l'injonction « on ne touche pas dans un musée ». Notons par ailleurs que sur ce prototype n'apparaissent pour l'instant ni écran de veille ni mode d'emploi. Après s'être rendu compte en regardant d'autres visiteurs qu'ils peuvent manipuler l'écran, environ la moitié de ces visiteurs reviennent vers le prototype. Ils tentent alors de le manipuler, ou ils restent en retrait pour observer quelqu'un en train de naviguer dans la maquette. Nous sommes en présence d'un phénomène d'apprentissage par procuration. Un des visiteurs a même déclaré : « Je n'avais pas compris que je devais cliquer ».

Ce phénomène d'apprentissage par procuration se vérifie avec une autre typologie de publics : les familles. Contrairement aux adultes, les enfants et adolescents observés (16 au total, allant de 5 ans à 17ans) n'ont aucune appréhension devant le dispositif. Ils essaient tous de le manipuler. Ces jeunes visiteurs ne sont évidemment pas seuls. Après quelques essais, ils interpellent parents, frères et sœurs pour partager l'expérience avec leurs proches. Les enfants vont dans un premier temps exprimer leur émotion : « trop beau, regarde ce que je peux faire ». Dans le cas de fratries, ceux qui ont d'abord observé souhaitent à leur tour pouvoir interagir avec l'écran : « Je peux essayer les couleurs ». Généralement les parents laissent les enfants manipuler et prennent plaisir à les observer. Le dispositif favorise l'échange entre parents et enfants. Geneviève Vidal soulignait déjà ce phénomène dans l'étude « Visites, usages et disposition à l'innovation au musée d'histoire de Nantes » réalisée en 2012 : « Au sein des groupes de visite, les usages par procuration sont fréquents, lorsqu'un des visiteurs du groupe pilote l'interactif. Mais parfois les rôles s'échangent. Généralement les parents laissent les enfants manipuler [...] Les multimédias apparaissent vecteurs d'échanges entre parents et enfants »³.

Le prototype ne possède pas aujourd'hui un niveau de lecture adapté aux enfants, ce sont donc surtout les parents qui interprètent pour eux le dispositif. Par exemple, une maman est questionnée par son fils de 8 ans : « Qu'est-ce que c'est ? ». Elle répond : « je ne sais pas », puis, après quelques instants de réflexion : « c'est une partie de la ville que tu ne connais pas. On reviendra quand tu connaîtras bien Nantes ». Il est aussi intéressant de noter la réaction de deux personnes, un père à sa fille de 12 ans, et un grand frère de 15 ans à son petit frère 8 ans, leur disant : « arrête de jouer » et « ce n'est pas un jeu ! ». Pour les adultes qui accompagnent des enfants au musée, la visite est certes un moment de plaisir et de convivialité, mais l'enjeu est aussi éducatif. Geneviève Vidal le constate : « Nous avons relevé quelques inquiétudes de la part d'adultes à l'égard des usages multimédias de leurs enfants, qui ne lisent pas les textes ; aussi souhaitent-ils « des contenus typiquement écrits pour les enfants »⁴.

³ *Op. cit.* p.4

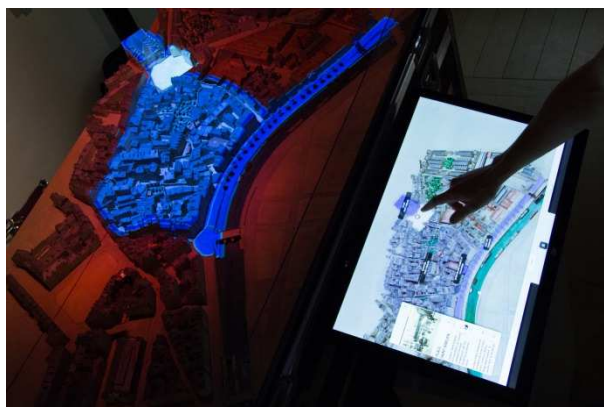
⁴ *Op. cit.* p.4



L'ergonomie

Durant la consultation par les visiteurs, nous avons pu repérer que face à un dispositif qui leur demande un effort, même si cette consultation se veut intuitive, les visiteurs cherchent dans les premières secondes à interagir avec l'écran et à repérer les effets qu'ils ont produits.

Plusieurs stratégies sont alors observées :



- La majorité des visiteurs utilisent un doigt pour interagir avec l'écran, ils attendent puis regardent quelle action ils ont provoquée. Le geste et le vocabulaire utilisés font alors référence au clic de la souris. Deux utilisateurs ont d'ailleurs utilisé le terme de « cliquer ».

- Certains visiteurs utilisent une gestuelle avec deux doigts pour agrandir les images et les contenus, ce qui n'est pas sans évoquer celle utilisée pour zoomer dans une image sur un écran de petite taille de type smartphone. Cette gestuelle n'est pas facile à utiliser et à adapter sur un écran tactile de 27 pouces. Quelques utilisateurs ont éprouvé des difficultés avec le zoom pour revenir en arrière.

- Les visiteurs qui actionnent la fonction défilement utilisent un doigt, deux doigts ou la main. Lorsque le visiteur utilise la main, le système ne comprend pas la demande de l'utilisateur. Cette fonction n'a pas été prévue dans le développement initial du système. Dans la version finale, cet aspect devra être approfondi, en prenant en compte cette gestuelle ou en la neutralisant.



– Les visiteurs observés ont peu utilisé la manipulation 3D. Nous remarquons qu'ils abandonnent très vite son utilisation. À ce stade de l'observation, il est difficile de dire si c'est par manque d'intérêt, par manque de temps, ou parce que cette fonction apparaît comme anecdotique avec un prototype de petite taille autour duquel on peut tourner.

Avec la maquette du port, autour de laquelle il n'est pas possible de tourner car elle est exposée contre un mur, la manipulation 3D sera conservée. Nous devons faire un choix qui permette aux visiteurs avec une interface 2D de manipuler facilement la 3D. Deux pistes sont à explorer : simplifier la manipulation en la limitant à une rotation ou proposer un affichage précisant mieux la fonctionnalité immersive⁵.

Un temps d'adaptation de quelques secondes est nécessaire pour utiliser le prototype. Ce temps est beaucoup plus rapide lorsque le visiteur a l'habitude d'utiliser des dispositifs tactiles de types smartphone ou tablette. Une fille de 12 ans à qui on demandait si l'utilisation était facile a répondu : « c'est comme une tablette. »

Passé le temps d'adaptation, les visiteurs observés vont ensuite s'intéresser au contenu, l'œil toujours rivé à l'écran. La première fonctionnalité utilisée est de se repérer géographiquement. Un des points les plus consultés est l'église Saint-Similien. C'est le seul édifice remarquable du prototype, facilement identifiable pour le public même s'il n'est pas nantais. Les visiteurs ont accès à des contenus historiques sous formes textuelle et multimédia (sur le prototype uniquement des images, mais à terme images, sons et vidéos).

Pour l'instant les visiteurs utilisent peu la fonction défilement des images, vraisemblablement parce qu'elle n'est pas comprise. La conception ergonomique est à revoir. Il est proposé de dissocier les contenus visuels et textuels. À terme, les images seront présentées sous forme de mosaïque. La lecture des textes des notices est vite abandonnée. Peu de visiteurs observés ont utilisé la fonction de défilement qui permet d'accéder à la partie du texte qui n'apparaît pas à l'écran. Les textes des notices sont aujourd'hui trop longs. Des adaptations ergonomiques et un travail sur la structure du texte pour en faciliter la lecture sont à prévoir.

La fonction des rebonds n'a pas beaucoup été utilisée par les visiteurs observés. Cette fonctionnalité permet à celui qui s'intéresse par exemple à l'élévateur à charbon d'avoir accès à des informations historiques sur d'autres éléments présents de la maquette ou sur des thématiques plus générales, comme l'usine à gaz qui utilise le charbon comme combustible ou le navire qui le transporte... Il est donc proposé au visiteur d'accéder à des données à différentes échelles.



Nous n'avons pas assez de recul pour dire pourquoi cette fonction est peu utilisée. C'est le premier dispositif interactif qui propose une consultation sur un mode non linéaire que le visiteur rencontre au cours de son parcours dans le musée, et il ne s'y attend sans doute pas. On peut supposer que cette fonctionnalité nécessite une adaptation particulière de la part du visiteur, une forme de visualisation spécifique (nuage de tags) et sans doute une bonne connaissance de la ville pour avoir envie de l'exploiter.

La réception par le public

Toutes les personnes qui ont été observées comprennent que le dispositif interactif donne à lire la maquette d'un quartier de Nantes. Les visiteurs, quel que soit leur âge, relèvent la tête après quelques secondes de consultation de l'écran pour regarder la maquette. Plus la consultation est longue, plus le visiteur s'intéresse aux données géographiques, plus il va regarder la maquette. Ce jeu de regard entre l'écran et la maquette s'accompagne d'une gestuelle particulière. Le geste le plus utilisé est l'index pointé vers la maquette pour indiquer un point précis à un autre visiteur. Quelques visiteurs se déplacent aussi autour de la maquette.

Le geste s'accompagne de commentaires. Les visiteurs, qu'ils soient nantais ou touristes, émettent des hypothèses en lien avec leur connaissance historique et géographique de la ville, comme par exemple ce couple de touristes de 60 ans. La femme demande à son mari : « C'est là où on a vu l'éléphant ? ». Il lui répond : « Ce n'est pas ça ! On avait traversé la Loire ». Les visiteurs créent du sens en puisant dans leurs connaissances préalables et en fonction de leur sensibilité.

Les visiteurs mettent en place des tactiques de partage des tâches, que ce soit pour l'accès aux contenus, la lecture de la maquette ou l'utilisation de l'écran. Ce phénomène avait déjà été observé par Geneviève Vidal. Ces tactiques les aident à appréhender le dispositif, qui peut paraître complexe à certains visiteurs.

Le temps de consultation

Même si le temps de consultation du prototype est variable d'un visiteur à l'autre, il est relativement court et n'a pas dépassé plus de 5 minutes lorsque le prototype a été exposé dans la salle 21 du musée. Plusieurs facteurs expliquent cette brièveté. Le premier, « l'économie de la visite », a bien été décrit par Geneviève Vidal : « Le sentiment de densité éprouvé par les visiteurs rencontrés les conduit à penser le temps et le rythme de leur visite. Ils veulent se repérer, faire des choix, être à l'écoute des membres de leur groupe, tout en composant avec les limites ergonomiques durant les consultations multimédias. Dans le flux de la visite, ils adaptent le temps consacré à la découverte de l'Histoire de Nantes. De fait, ils ne s'arrêtent pas nécessairement dans toutes les salles, ne consultent pas toutes les médiations. De la flânerie à l'exhaustivité, en passant par la sélection thématique, les visiteurs considèrent l'économie de temps de leur visite. L'accès par l'approche chronologique ou l'approche thématique est bien identifié. En général, les visiteurs passent du temps sur les premières bornes, les consultent en entier, puis au fil de la visite, plus rapidement et partiellement. Certains balaient du regard chaque salle pour décider de s'y attarder

ou non. D'autres, à partir du plan qu'ils ont étudié au début de la visite, expliquent "une stratégie de gain de temps". À partir des salles 14 ou 16, plusieurs visiteurs commencent à éprouver de la fatigue et de la lassitude provoquant une accélération, qui a pour conséquence un « fléchissement des usages des interactifs ». Un deuxième facteur est sans doute lié au fait que le prototype actuel n'a pas la qualité du dispositif final. La maquette du port en 1900 suscite déjà aujourd'hui la curiosité du visiteur, même s'il a du mal à l'interpréter car elle n'est pas encore équipée d'un dispositif interactif d'aide à la lecture. En entrant dans la salle 21, il cherche spontanément des points de repères sur la maquette du port. Celle-ci comporte beaucoup plus d'édifices remarquables, on peut donc penser que la consultation y sera plus étendue et plus longue que sur le prototype.

Le prototype ne permet pas dans sa configuration actuelle d'évaluer l'ensemble du projet mais il nourrit la réflexion sur les modes de navigation et de manipulation des données qui seront proposés dans le dispositif muséographique final, mais aussi plus globalement sur la médiation de l'histoire.

Nous allons poursuivre cette phase de test avec le public du musée car elle est riche d'enseignements. La prochaine étape sera notamment d'observer un public de Nantais qui a une bonne connaissance de la ville. Parallèlement, des évolutions seront apportées à l'ergonomie du prototype car tous les codes de consultation ne sont pas compris. Un écran de veille permettra d'inciter le visiteur à manipuler l'interface en lui suggérant les premières clés pour la navigation (sélection, défilement d'images, etc). Ce dispositif sollicite la capacité des visiteurs à se repérer dans l'espace de la maquette et de l'écran, et nécessite de leur part un engagement actif, il n'est donc pas étonnant que sa réception soit très différente d'un visiteur à l'autre. Il faut accepter que certains n'aient pas envie de l'utiliser.

Améliorer l'ergonomie du dispositif va permettre de lever certaines situations qui peuvent mettre les visiteurs en difficulté. Bien que le repère temporel du projet et donc des contenus proposés soit la période représentée par la maquette, l'intégration de points de repères contemporains est une piste à étudier sérieusement.. Cela faciliterait l'interprétation des données par les visiteurs qui vont puiser dans leur connaissance de la ville actuelle.

Un des points important du projet est l'aspect collaboratif et multiutilisateur. Les premières évaluations confirment que le dispositif favorise la sociabilité et l'échange au sein des familles mais aussi entre adultes.

Ce dispositif dans sa conception globale intègre de nouveaux usages en proposant une expérience de visite qui englobe un avant et un après la visite. Le public interagit avec la maquette tout en approfondissant ses connaissances. Il va aussi participer à la circulation des données et à l'enrichissement des contenus puisqu'il sera invité à enrichir la base de données en participant à la collecte virtuelle. Le musée d'histoire de Nantes accorde une place importante aux collectes, elles permettent de renouveler la relation aux publics. Les habitants et leurs familles, par leur apports- prêts d'objets, de photos, dons, témoignages filmés- deviennent des acteurs de l'histoire exposée; ils ne sont plus de simples visiteurs. Cette participation active crée une nouvelle forme d'appropriation à la fois du musée mais aussi de la ville. Le dispositif donne envie de redécouvrir et de parcourir ce quartier de Nantes. Le développement de ce projet ouvre sans aucun doute un nouveau cadre d'usages.

Annexe E

Compte-rendu de l'exposition Digital Heritage International Congress 2013

Le congrès organisait en marge de la conférence scientifique une exposition dédiée aux dispositifs innovants en matière d'utilisation des technologies numériques pour le patrimoine. 34 stands composaient cette exposition. Les organisateurs annoncent un nombre de visiteurs de 5000 sur les 5 jours d'exposition (600 congressistes confondus).

L'exposition faisait la part belle aux technologies innovantes (convoyeur d'objets de collection avec scan 3D intégré par Fraunhofer, NFC) et usages innovants de technologies (navigation dans un monde 3D via Kinect, réalité augmentée sur tablette, etc.).

À noter que les dispositifs s'appuyant sur de la navigation dans un monde virtuel ont encore une valeur scientifique et muséographique à justifier... La gestuelle est complexe (cf. Imago Bononiae), et des explications préalable sont nécessaires, le temps à passer est non négligeable, etc.

Quelques installations concernaient l'utilisation de « serious games » avec un usage principalement dédié au web (à part le projet Excavate & Learn qui visait à expliquer la méthodologie de l'archéologue avec un système de tags NFC : le visiteur effectue une fouille fictive dans une zone déterminée et obtient des informations sur les objets trouvés au fur et à mesure de ses découvertes).

À noter aussi l'importance du « story telling » personnalisé : en fonction du profil visiteur, l'application sur tablette par exemple va guider celui-ci dans le musée et adapter son dialogue (personnage fictif en général). Exemple : chessexperience.eu.

Nantes1900

Les retours ont été encourageants tant de la part des professionnels (Patrice Bourdelais - responsable SHS au CNRS, Pascal Lievaux – responsable du département de la politique recherche et science du ministère C&C, Livio De Luca, Sofia Pescarin – organisateurs de la conférence, et bien d'autres chercheurs) que du public. Les historiens soulignent l'intérêt de rendre compte d'une histoire au travers du dispositif et pas seulement d'un rendu statique des informations disponibles.

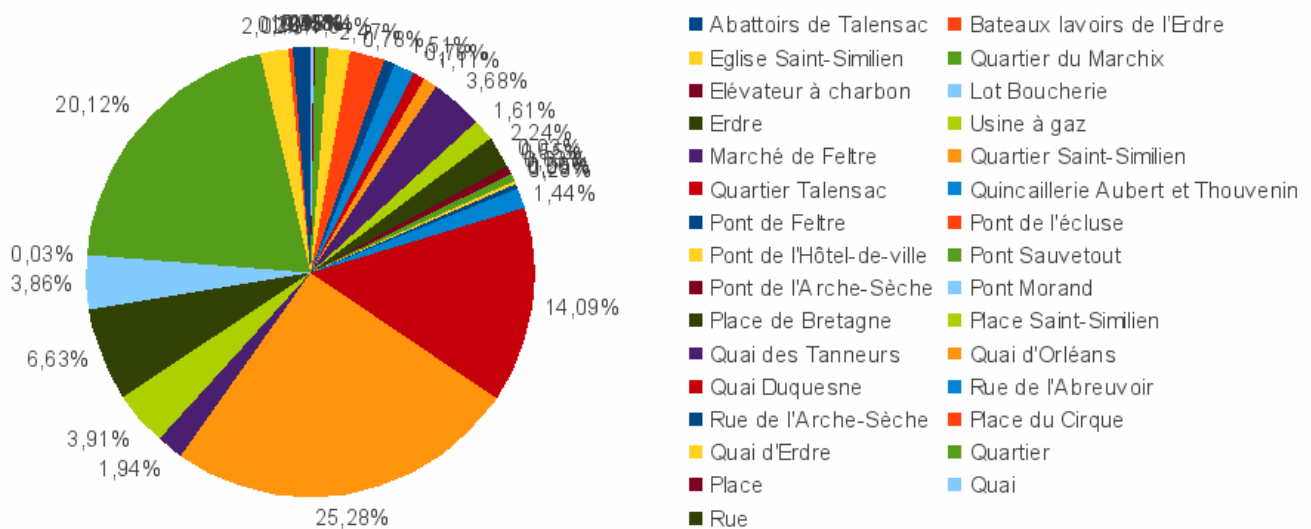
Remarque personnelle : la visualisation d'un ensemble de contenus (carrousel) plutôt que des unités fait automatiquement naître du sens dans l'esprit des gens. De même, l'expérience en groupe fait naître de nouvelles connaissances.

On peut dire que le projet Nantes1900 a fait parler de lui.

À noter les félicitations du staff technique pour le système de fly-case « tout-en-un » : pas de matériel à faire commander et installer par les organisateurs, temps de montage/démontage réduit, autonomie, etc.

Du point de vue technique, toutes les mises à jour n'avaient pas été faites comme demandé, ce qui a causé de nombreux bugs, notamment au début. Certains problèmes ergonomiques sont encore flagrants mais déjà identifiés :

- il manque un écran de veille incitant à la manipulation



- la gestuelle est encore approximative, notamment en ce qui concerne le conflit entre navigation dans le fond de carte et manipulation du carrousel
- les rebonds thématiques ne sont pas utilisés (pour ce que j'ai pu observer) : problème d'affichage trop discret ?
- La fenêtre 3D pose encore des problèmes, les gens l'ouvrent mais la gestuelle est chaotique (et le résultat ne l'est pas moins) : à centrer sur l'élément sélectionné ?
- l'application semble fatiguer au fil du temps

En revanche, la sélection d'images d'époques avec possibilité de zoom important provoque l'effet « waouh » escompté, de même que la projection sur la maquette, chez les jeunes comme chez les moins jeunes.

Autre effet intéressant : le stand était visible depuis l'allée principale, dans le sens de la progression des visiteurs. Nous avons pu observer que ceux-là sont attirés par le dispositif (éclairage sur la maquette, écran, ambiance lumineuse mystérieuse ?) et font un détour pour venir voir.

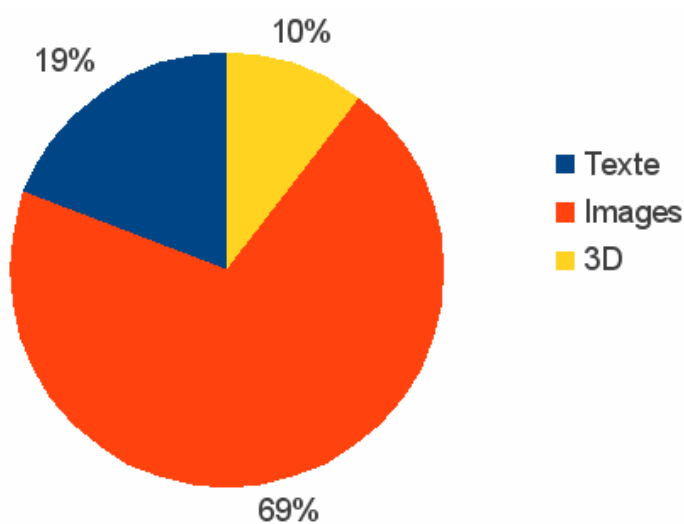
L'application en français seulement était un frein évident pour le public étranger, mais l'aspect recherche n'a pas échappé aux chercheurs étrangers.

J'ai pu mettre en place un système de monitoring pour enregistrer les actions des utilisateurs. La question du traitement de ces données est encore à creuser mais voici quelques résultats :

Les chiffres indiqués se basent sur l'étude de 3 jours d'exposition : 30/10,31/10,01/11. L'enregistrement a duré 29h en tout et 4700 actions ont été relevées tous types confondus.

Lors de la sélection d'une zone, le quartier Saint-Similien est sélectionné environ 25 % du temps, et le quartier du Marchix 20 % du temps. Viennent ensuite le quartier Talensac avec 14 % du temps et l'Erdre 7 % du temps. Il est intéressant de noter que ces chiffres sont similaires en ne tenant compte que des enregistrements d'une journée (le comportement est donc homogène d'une journée à l'autre).

Outre le fait que les 3 quartiers obtiennent la majorité des sélections (phénomène dû au choix ergonomique d'affichage en 2 temps : quartier \rightarrow zone), l'affichage des zones proches lors d'une sélection permet d'éviter que des zones ne soient jamais sélectionnées. La place de l'écluse fait exception, sans doute dû



Répartition des actions dans le carousel

à sa situation sur le fond de plan et à sa taille très réduite. Une autre explication vient du fait que cette place n'est pas incluse dans un quartier ce qui induit un très faible taux d'affichage à l'utilisateur.

En outre, il est intéressant de constater la part des sélections de sous-éléments à l'intérieur des 3 quartiers : un sous-élément est sélectionné 76 % du temps après avoir sélectionné le quartier du Marchix, 50 % du temps pour le quartier Saint-Similien, et 62 % du temps pour le quartier Talensac.

À noter que les rebonds thématiques (Quartier, Quai, Place, Rue) ont été rarement sollicités. Le mot-clé quartier est le plus représentatif, ce qui est logique vu l'immense majorité d'actions sur les 3 quartiers de la maquette. Il a été sélectionné 41 fois, soit 1 % du temps. Si cela peut sembler faible, il faut néanmoins le comparer au nombre de fois où un **élément du carousel est sélectionné : 15 % du temps**. C'est à dire que 5 fois sur 6, aucune action n'est effectuée autre que celle de sélectionner une zone.

Un affichage différent (nuage de tags à proximité de la zone sélectionnée par exemple) donnerait peut-être d'autres résultats.

Parmi les actions sur le carousel, une image est sélectionnée 70 % du temps, le texte 20 % et la 3D 10 %.

En ce qui concerne les images, **98 images différentes** ont été sélectionnées. Ce qui représente presque **50 % du nombre total** d'images disponibles dans la base de données. Chaque image est sélectionnée en moyenne **5 fois chacune**, indépendamment de la zone sélectionnée.

La fenêtre de texte a été ouverte 139 fois soit **20 % des actions effectuées dans le carrousel**. Elle n'avait été ouverte que 13 % du temps sur la journée du 30/10, ce qui s'explique par le fait que le programme ait été modifié après ce jour pour faire apparaître la fenêtre de texte en premier dans le carrousel.

Le temps moyen passé sur une sélection est de 6s environ. Ensuite, le temps moyen passé sur une image est de 9s, de 7s sur la fenêtre de texte ou la 3D. Ces temps sont donnés à titre indicatif car on ne peut pas distinguer les utilisateurs.

Des prises de vue ont permis de réaliser une vidéo promotionnelle du dispositif : <http://www.youtube.com/watch?v=L9jUIV2-njg>

Annexe F

Proposition initiale du sujet de thèse

Cette annexe se compose du document faisant office de la proposition initiale de sujet pour la présente thèse. Ce document faisait partie du dossier pour la demande de bourse CIFRE.

Modélisation et intégration de données hétérogènes sur un cycle de vie produit complexe Application via la mise en place d'un PLM pour la muséologie

F.1 Le contexte industriel du projet

Ce projet de recherche fait suite aux initiatives menées depuis 2008 en collaboration avec deux laboratoires universitaires nantais (l'IRCCyN à l'Ecole Centrale de Nantes (UMR CNRS 6597) et le Centre François Viète d'histoire des sciences et des techniques à l'Université de Nantes (EA CNRS 1161)) avec la S.P.L. Le Voyage à Nantes ; plus particulièrement le Musée du château des Ducs de Bretagne qui en dépend, lieu dédié à l'histoire urbaine de Nantes et labellisé « Musée de France ».

A l'origine, le projet « Nantes 1900 » s'inscrit dans la volonté de mieux connaître et de valoriser un objet patrimonial exposé dans le musée : la maquette physique du port de Nantes. A l'heure où Nantes se voulait un grand port de la façade Atlantique, afin de valoriser son image maritime, la Chambre de Commerce de la ville commanda une maquette du port pour l'Exposition Universelle de 1900. Régulièrement mise à jour jusqu'à la Première Guerre, elle fut ensuite donnée à la Ville de Nantes. Désormais devenue une pièce maîtresse des collections municipales, elle est aujourd'hui exposée au sein du Musée d'Histoire de Nantes.

Comme « un poisson dans son aquarium », cet objet est dans une vitrine, presque inerte. Il est pourtant porteur de sens profond car il permet d'expliquer le dynamisme industriel avec lequel la ville de Nantes s'est développée. Ainsi, le Musée a décidé d'envisager de nouvelles formes de valorisation aussi bien d'un point de vue scientifique que muséographique. Souhaitant que la valorisation de cette maquette soit multimédia et audacieuse, une solution de la famille des « nouvelles technologies de l'information et de la communication » est recherchée. Elle devra aider à la compréhension de la maquette, notamment au niveau du fonctionnement de la ville et du port en 1900. Le dispositif permettra d'accéder aux données historiques à l'aide d'un outil multimédia en permettant de renforcer le discours muséographique ; il s'agit ici de permettre une meilleure compréhension des objets patrimoniaux par l'exploitation des connaissances virtuelles associées, aussi bien à destination du grand public que des experts ou des entreprises. L'enjeu scientifique résidant dans la mise en place d'un nouveau Système d'Information à vocation patrimoniale qui se doit d'être pérenne sur le temps long (50 ans) en permettant une encapsulation de données hétérogènes.

F.2 Le contexte scientifique du projet

D'un point de vue scientifique plus général, le domaine de la muséographie numérique est en plein développement depuis plusieurs années mais l'évolution actuelle s'oriente vers les systèmes et ensembles industriels anciens, afin d'enrichir les moyens d'accès à l'histoire des techniques par une mise en situation virtuelle d'un visiteur. Dès lors, les outils des Sciences pour l'ingénieur peuvent être "détournés" de leur fonction première et être utilisés à des fins de reconception de machines physiques. Les méthodes de numérisation 3D et de reconception de surfaces constituent un des champs d'investigation afin de pouvoir capitaliser l'objet dans son contexte. En effet, considérer un objet technique seul n'a pas de sens. Il est indispensable de le recontextualiser dans son utilisation d'origine, dans ses différentes phases de vies afin de pouvoir en cerner toutes ses dimensions et toutes ses transformations. Ainsi, compte-tenu de la masse colossale d'informations hétérogènes à intégrer, l'ensemble des outils du virtuel vont aider à structurer cette capitalisation. Puis, à la fin du processus de rétro-conception patrimonial, les outils et les interfaces de Réalité Virtuelle permettront de diffuser cette connaissance capitalisée. Les travaux de recherche menés conjointement par l'équipe IS3P de l'IRCCyN (Institut de recherche en Communications et Cybernétique de Nantes, UMR CNRS 6597, Ecole Centrale de Nantes, Université de Nantes et Ecole des Mines de Nantes) et le CFV (Centre François Viète, Epistémologie Histoire des Sciences et des Techniques, Université de Nantes, EA 1161) ont permis d'acquérir une expérience avancée dans le domaine du virtuel pour le patrimoine :

1. depuis la numérisation de l'objet et la capitalisation des connaissances ;
2. en passant par la modélisation numérique de l'objet physique et de sa dynamique ;
3. jusqu'à sa vulgarisation dans un cadre muséal, d'expertise et d'archivage.

L'enjeu de ce processus réside dans la complémentarité des liens. Il faut une interopérabilité totale des étapes afin d'éviter la perte d'informations. Cependant, une des difficultés réside dans la complexité de vouloir généraliser la méthode. En effet chaque objet patrimonial est unique et fait appel à des connaissances, des savoir-faire ancestraux et des expertises contemporaines divers et propres à lui seul ; de plus, lorsqu'un objet est capitalisé/numérisé, la dernière étape de valorisation n'est quasi jamais connue. Aussi, il convient de capitaliser un maximum d'informations, de les organiser et les interlier afin de pouvoir envisager un large spectre de possibilités de valorisation. Nos objets contenus dans les lieux de mémoire, plus communément appelés Musées, ne sont pas uniquement destinés à "prendre la poussière sur une étagère", ils doivent devenir lieu de savoir, lieu d'appropriation de savoir-faire et porteur d'un message à destination de l'ensemble des acteurs de cet objet et non seulement au grand public ou à une poignée d'experts. Il faut diffuser cette connaissance à une plus large population ; cela passe donc par la création d'un outil conceptuelle ayant une véracité scientifique non négociable. Il s'agit là de l'objet de cette thèse CIFRE.

En 2007, une première thèse de doctorat, en co-tutelle Sciences pour l'Ingénieur et Sciences Humaines et Sociales, a été soutenue sur ce sujet (voir les références bibliographiques en fin de ce Projet de sujet thèse). Basée sur une allocation de recherche ministérielle, les principes méthodologiques et le modèle d'information créés ont permis d'avancer projet par projet. Il s'agit désormais de rendre ce méta-modèle opérationnel : le Digital Heritage Reference Model, appelé à devenir la nouvelle référence en matière de muséologie du patrimoine, étant entendu que la définition de la muséologie va de la capitalisation des objets à sa valorisation pour des experts ou pour le grand public. Le DHRM se définit comme l'ossature générale infrastructurelle, architecturale et temporelle de la description d'une chose, d'un objet, d'un processus... C'est une structure d'information atemporelle et adimensionnelle permettant d'encapsuler un Système Technique complexe. Le DHRM permet une description multi-temporelle (du passé vers le futur ou du futur vers le passé) ainsi qu'une description multi-dimensionnelle (de l'infrastructure vers l'architecture ou de l'architecture vers l'infrastructure). En outre, ce Système d'Informations définit les étapes sur le temps long destiné à guider les acteurs du processus de patrimonialisation ; il permet la projection de la variation des états intermédiaires de l'objet technique ancien.

Mais la complexité des artefacts historiques est bien plus élevée que celle des produits issus de l'industrie manufacturière. Les modèles produits utilisés dans nos entreprises contemporaines, même si complexes et difficiles à mettre en place, prennent très rarement en compte le temps long et la multiplicité des points de vue. Il s'agit donc ici de proposer une avancée bijective où l'étude et la modélisation des objets patrimoniaux permettra d'enrichir les modèles dirigeant notre société d'aujourd'hui. A terme, l'idée est de ne pas subir la patrimonialisation d'un objet mais d'en anticiper son déclin lors de sa phase de création et d'utilisation. Si la capitalisation est anticipée dès le début du cycle de vie du produit, il en sera alors bien plus aisé de le valoriser en fin de vie. D'un point de vue industriel, la proposition est donc de rajouter les couches dédiées au patrimoine (issues du DHRM) directement au sein des Systèmes d'Informations des entreprises contemporaines (gain de temps pour la suite du processus patrimonial).

F.3 Objectifs de la thèse / Résultats attendus / Défis scientifiques et techniques à relever

L'objectif est de développer un modèle d'information et une méthode de valorisation de ce modèle au sein d'un outil permettant de pouvoir capitaliser l'ensemble des connaissances d'un objet patrimonial. Il s'agit de pouvoir réaliser un lien entre l'objet physique (généralement exposé dans un Musée), sa représentation numérique et les éléments issus de son contexte (traces ou archives) permettant d'en cerner toute sa compréhension.

Ces traces ou archives seront donc, avant tout, des données hétérogènes (historiques, techniques, économiques. . .) qu'il conviendra de capitaliser. S'en suivra une phase de reconnaissance et de traduction temporelle ; en effet, les archives sont parfois exprimées dans un langage différent du notre, dans l'époque moderne. Il s'agit ici de définir de nouveaux moyens de compréhension des connaissances anciennes ; on ne s'orientera donc pas uniquement vers des grilles de lecture "manuelles" qui seraient superposées les unes aux autres mais vers la construction d'ontologies à encapsuler dans le nouveau système d'information. Enfin, ces éléments seront mis en interrelation afin d'être rendus intelligibles. Les connaissances formées, il faudra les stocker dans un Système d'Information dirigé par un modèle intelligent. S'agissant ici d'objets ayant suivi un temps long, les modèles mis en regard devront prendre en compte cette possibilité d'évolution et ainsi envisager d'être auto-alimentés par un méta-modèle de données. Il s'agit donc d'étudier les objets selon un nouveau Cycle de Vie qu'il conviendra de préciser. Un modèle devra diriger la base qui permettra d'encapsuler la connaissance.

Cet outil complet renseignera alors l'objet : c'est ce que nous appelons, *apriori*, le PLM muséologique (Product LifeCycle Management – Gestion du Cycle de Vie Produit). Il pourra ensuite continuer à être alimenté par les futures connaissances acquises. Et celles-ci pourront également être consultées, valorisées, étudiées au fur et à mesure de la nouvelle vie de l'objet. L'objectif principal est de rendre l'objet patrimonial "vivant" afin qu'il soit lui-même acteur de son futur.

L'objet d'expérimentation sera la maquette du port de Nantes en 1900. Le musée ayant décidé d'améliorer la présentation de ces objets patrimoniaux, à l'aide d'outils interactifs, pédagogiques et technologiques, le projet de revalorisation de cette maquette de Nantes datant de 1900 devra pouvoir tirer profit de toutes les sources documentaires disponibles autour de l'histoire du port. Le PLM muséologique sera le cœur du système. Ainsi mis à la disposition du public de manière pratique et intuitive, ces documents permettront de mettre en place un dispositif interactif entre le visiteur, le réseau internet, la maquette physique et la base de données associée à la représentation virtuelle de l'objet. Le visiteur ou l'internaute pourra alors accéder directement aux connaissances capitalisées. Des filtres automatiques permettront de ne mettre à disposition que les éléments attendus et non l'ensemble des connaissances disponibles qui noierait alors le visiteur dans ses recherches.

Il s'agit d'un sujet qui servira d'expérimentation pour mettre en place une méthodologie de projets patrimoniaux plus large. En effet, la Gestion de Projets Innovants en muséographie est une discipline encore hésitante ; l'objectif de cette thèse est de fournir un nouveau cadre de référentiel. A ces fins, les résultats

seront expérimentés, dans un premier temps, au Musée d'Histoire de Nantes ; en parallèle, un colloque international est en train d'être mis en place afin de mutualiser les expériences et d'aider à la structuration de la démarche. De plus, des collaborations à l'échelle internationale renforceront cette initiative (voir partie 4. ci-après).

De manière synthétique, les résultats attendus de la thèse sont les suivants :

- Méthodologique : mise en place d'un processus de patrimonialisation dédié aux objets complexes à vocation muséographique
- Base de connaissances : création d'un modèle d'information
- Outils : réalisation du PLM muséographique associé

F.4 Cadre de la thèse / modalités pratiques

Le cadre proposé s'appuie sur le développement des opérations futures en terme de rencontre réflexive entre les Sciences pour l'Ingénieur et les Sciences Humaines et Sociales.

La proposition consiste en une thèse CIFRE qui serait une pérennisation possible des travaux de prospective menés par un étudiant au cours de son stage de Fin d'Etudes d'Ingénieur, mais en appuyant la dimension institutionnelle recherche, avec un cadre cohérent pour l'ensemble des interlocuteurs pédagogique et recherche des campus nantais. Ce travail fait suite à la thèse de Florent LAROCHE (co-encadrant de cette thèse CIFRE) qui a proposé une méthodologie complète pour la muséologie, sur la base d'un modèle générique (le DRHM Digital Heritage Reference Model – décrit ci-avant), et qui a consacré ses applications à la représentation des objets techniques anciens. Pour le Musée du Château des Ducs de Bretagne, il s'agit là d'une opportunité permettant de tester à grande échelle, un outil pour penser le Musée de demain, un musée « in-vivo » (on peut citer les initiatives menées par le laboratoire de muséologie LAMIC à Québec avec qui, des collaborations se mettront en place dans le cadre de cette CIFRE). Même s'il s'inscrit principalement dans quelques domaines particuliers qui en constituent la base scientifique, ce projet est avant tout pluridisciplinaire : du fait de l'ensemble des savoir-faire requis, des partenariats avec des organismes privés ou publics seront mis en place pour avancer, aussi bien d'un point de vue méthodologique que technologique. On pourra ainsi citer :

- IRCCyN, Institut de Recherche en Communications et Cybernétique de Nantes (UMR CNRS 6597)
- CFV, Centre François Viète, Epistémologie, Histoire des Sciences et des Techniques (EA 1161)
- LINA, Laboratoire d'Informatique de Nantes Atlantique (UMR CNRS 6241)
- CERMA, Laboratoire de Recherche Méthodologique d'Architecture (UMR 1563 Ambiances architecturales et urbaines)
- CRHIA, Centre de Recherches en Histoire Internationale et Atlantique (EA 1163)
- IRSTV, Institut de recherche Sciences et techniques de la Ville (FR CNRS 2488)
- LAMIC, Laboratoire de Muséologie de Québec, Université de Laval, Canada.

Ce programme de recherche s'appuiera tout d'abord sur le cas d'application de la maquette du port de Nantes en 1900 ; cependant, les interfaces et modèles développés devront être transférables sur l'ensemble des objets du Musée ainsi que sur d'autres Musées et à terme, permettre l'inter-relation entre les Musées, lieu de conservation de notre savoir. Cette dernière phase de valorisation et de transfert de technologie est un des axes forts pour lequel nous sollicitons une CIFRE ; ce cadre de recherche permet ainsi un réel lien entre la recherche fondamentale et la recherche appliquée. Le Musée du Château des Ducs de Bretagne offre alors le point de départ pour initialiser ce nouveau processus de valorisation. Le doctorant sera accueilli dans les bureaux du Musée au sein du Service Nouvelles Technologies. D'autre part, il s'intégrera au sein de l'équipe IS3P- Ingénierie des Systèmes : Produits, Performances, Perceptions - de l'IRCCyN (UMR CNRS 6597), en collaboration étroite avec le laboratoire CFV (EA CNRS 1161).

A l'issue de cette thèse CIFRE, des investigations entrepreneuriales sont sérieusement envisagées si les résultats permettent un transfert technologique vers une société dédiée à la valorisation des éléments méthodologiques et de l'outil développé. Compte-tenu de la généricité du modèle sur lequel ce travail se base et de la généricité des méthodes et outils proposés, les domaines d'application pourraient être étendus à la muséologie industrielle, au patrimoine culturel et artistique, etc.

Le démarrage de la thèse est envisagé pour septembre 2011 sur une durée de trois ans et découpée comme suit :

1. Etat de l'art (6 mois)
 - Etude bibliographique
 - Prise de connaissance des travaux menés sur les recherches précédentes
2. Modèle d'information et dispositif expérimental (1 an)
 - Définition du modèle d'information dédié
 - Proposition d'une interface innovante
 - Mise en place du PLM muséologique
3. Expérimentation (1 an)
 - Test du PLM muséologique
 - Retour d'expérience et finalisation
4. Synthèse et valorisation (6 mois)
 - Synthèse globale des travaux, rapport de thèse et conclusions
 - Perspectives d'évolution et axes de recherche complémentaires

F.5 Références bibliographiques

F. LAROCHE, **Contribution à la sauvegarde des Objets techniques anciens par l'Archéologie industrielle avancée : Proposition d'un Modèle d'information de référence muséologique et d'une Méthode inter-disciplinaire pour la Capitalisation des connaissances du Patrimoine technique et industriel**, Thèse de Doctorat, Laboratoire IRCCyN, Ecole Centrale de Nantes, 563 p. + annexes, décembre 2007, 1er Prix des Thèses Le Monde de la Recherche en 2008, 1er prix du « Reverse-Engineering » de l'Association française de prototypage Rapide, 2ème prix ex æquo des thèses de Nantes Métropole

F. LAROCHE, A. BERNARD, **How to inject ancient know-how for future design : using Advanced Industrial Archaeology during pedagogical projects**, International Journal of Product Development, Editions Inderscience, ISSN 1477-9056, à paraître, 2011

M. COTTE, F. LAROCHE, **Le patrimoine technoscientifique et les nouvelles techniques d'ingénierie : des perspectives de développement et des métiers nouveaux**, 17ème symposium scientifique de l'ICOMOS, Paris – communication acceptée, novembre 2011

F. LAROCHE, J.-L. KEROUANTON, **Creating interactivity of our heritage stored in Museums : Experimentation with Château des Ducs de Bretagne History Museum of Nantes**, Conférence scientifique VRIC, Salon Laval Virtual, Laval, France – ISBN 2-9515730-9-X - www.laval-virtual.org, 2010

F. LAROCHE, **Une nouvelle forme de capitalisation des connaissances grâce à l'Archéologie Industrielle Avancée**, Revue DHT, Dossier pour l'Histoire des Techniques, n°18, 2èmes semestre 2009, pp.51-60 – ISBN 9782953077902, 2010 F. LAROCHE, D. PASTUREL, J.-L. KEROUANTON, M.-E. LECOQ, **Quand les NTIC rassemblent didactique et patrimoine**, 3ème journées démonstrateurs, club EEA, Angers, 10 p. - www.clubeea.org

C. CHEVRIER, K. JACQUOT, J.P. PERRIN, **3D modelling of a townscape model**, Proceedings of the EuroMedConference, Limassol, Cyprus, 10 pages, 8-13 Nov 2010

- F. LAROCHE, A. BERNARD, M. COTTE, **Advanced Industrial Archaeology : A new reverse-engineering process for contextualizing and digitizing ancient technical objects**, Journal Virtual and Physical Prototyping, Vol. 3, n°2 – Effective Reverse-Engineering Issues, Taylor & Francis, ISSN 1745-2759, pp.105-122, 2008
- F. LAROCHE, **Advanced Industrial Archaeology and Techno-Museology : A new virtual life for industrial heritage**, International Committee for the Conservation of the Industrial Heritage, TICCIIH Bulletin, number 41, summer 2008, ISSN 1605-6647, pp.3-4 – www.mnactec.com/ticcih, 2008
- F. LAROCHE, A. BERNARD, M. COTTE, **Une vision produit-process et sa méthodologie dédiée à la sauvegarde du patrimoine technique et industriel sous une forme virtuelle**, Revue Ingénierie Numérique Collaborative, best paper award of CPI 2007 conference, Rabat, Maroc, 26 p., 2008
- S. POUYLLAU, **Digital humanities en France : le temps des pionniers**, <http://blog.stephanepouyllau.org/digital-humanities-en-france-le-temps-des-pionniers/>, 2008
- A. BERNARD, F. LAROCHE, S. AMMAR-KHODJA, N. PERRY, **Impact of new 3D numerical devices and environments on redesign and valorisation of mechanical systems**, CIRP Annals, Vol. 56-1, ISSN 0007-8506, pp.143-148 - www.cirp.net
- F. LAROCHE, A. BERNARD, M. COTTE, **Between heritage and Industrial Engineering, a new life for old product : virtuality**, revue Research in Interactive Design, Vol.2, 7 p., Ed. Springer, ISBN 2-287-48363-2 - www.virtualconcept.estia.fr, 2006
- P. FLEURY, **La Rome antique sur l'internet**, Informatics and statistics review for human sciences, 1997

Annexe G

Cahier des charges fonctionnel pour le développement d'un outil muséographique interactif dédié au projet Nantes1900

Cette annexe permet de décrire les attendus en terme de fonctionnalités du système muséographique souhaité par le musée d'histoire de Nantes. Celui-ci a la particularité de mentionner l'assistance à la maîtrise d'ouvrage pour la conception des fonctionnalités mêmes du dispositif, ceci dans une optique de répondre le plus justement à une problématique scientifique et pas seulement à un descriptif technique. Ce document a été rédigé par Christophe Courtin, responsable du services des projets numériques au château des ducs de Bretagne, et moi-même.



LE VOYAGE À NANTES CHÂTEAU DES DUCS DE BRETAGNE

Cahier des charges pour la conception et le développement d'une application tactile multipoints et multi-utilisateurs exploitant le contenu d'une base de données en ligne.



Le Voyage à Nantes, 1-3 rue Crucy, BP 92211, 44022 Nantes Cedex
Pour le compte du château des ducs de Bretagne

Contacts :

Christophe Courtin, Responsable service nouvelles technologies,
Tél. 02 51 17 49 05, Mob. 06 77 003 771, Mél. Christophe.Courtin@chateau-nantes.fr
Benjamin Hervy, Service nouvelles technologies — Chargé de projet,
Tél. 02 51 17 49 07, Mél. Benjamin.Hervy@chateau-nantes.fr

Table des matières

1. Objet du cahier des charges	3
2. Pièces contractuelles	4
3. Modalités de consultation	4
3.1 La composition du dossier	4
3.2 Le jugement des offres	5
4. Modalités d'exécution	6
4.1 Délais d'exécution.....	6
4.2 Modalités de réception.....	6
4.3 Garantie.....	6
5. Description des prestations	7
6. Prix / modalités de détermination du prix	7
6.1 Prix.....	7
6.2 Conditions générales de l'offre des prix	7
6.3 Révision des prix.....	7
7. Modalités de facturation.....	8
7.1 Paiement.....	8
7.2 Présentation de la facture.....	8
7.3 Remise de la facture.....	8
7.4 Paiement.....	8
7.5 Résiliation.....	9
7.6 Sous-traitance.....	9
8. Documents à remettre.....	9
9. Changement dans la structure de l'entreprise.....	10
10. Durée du contrat.....	10
11. Juridiction compétente.....	10
Annexe 1 : Note d'intention.....	12
Annexe 2 : Bordereau de prix.....	14
Annexe 3 : Acte d'engagement.....	15

Préambule

Le Château des ducs de Bretagne et son musée d'histoire

Construite par le duc François II et sa fille Anne de Bretagne, la forteresse abrite un palais ducal du XV^e siècle en pierre de tuffeau qui contraste par sa blancheur et son raffinement sculpté avec la rudesse des murailles extérieures.

À l'intérieur du château-musée...



L'impressionnante restauration de l'édifice, classé Monument historique, marque le visiteur qui pénètre dans la cour. Une fois poussées les portes du Grand Logis, celle-ci s'apprécie tout autant à l'intérieur dans les 32 salles où s'est glissé le musée d'histoire de Nantes. L'architecture du 15 siècle dialogue avec les 850 objets de collection et les dispositifs multimédias dans une scénographie contemporaine.

Le portrait de la ville qui est présenté croise les grands moments de l'histoire européenne et mondiale, de l'Édit de Nantes aux grands bouleversements du 20 siècle en passant par le commerce colonial et la traite négrière (cf. www.chateau-nantes.fr). Le musée d'histoire de Nantes au sein du château des ducs de Bretagne présente en 32 salles une histoire de Nantes et de la région. Ouvert en 2007, le musée d'histoire de Nantes a eu un important recours aux technologies audiovisuelles et multimédia. De nombreux dispositifs, film, bornes interactives, 3D temps réel jalonnent le parcours permettant au public d'avoir une pratique ludique et intuitive de l'histoire.

1. Objet du cahier des charges

Le présent cahier des charges concerne la conception et la réalisation d'une application tactile multipoints, exploitant le contenu d'une base de données.

En salle 21 se trouve une maquette du port de Nantes réalisée au tout début du XX^e siècle par Paul Duchesne, pour l'exposition universelle. Depuis 2008, un projet de recherche et développement a été mis en place pour valoriser cet objet patrimonial par le biais des nouvelles technologies.

L'objet de la présente consultation est la conception graphique et ergonomique, par des suggestions de navigation et de scénarios d'utilisation, ainsi que le développement informatique d'une application tactile multipoints intégrée dans un dispositif interactif autour de la maquette du port. Des écrans LCD multipoints d'une diagonale de 40 pouces seront à terme disposés devant la maquette et mis à disposition du public. Le matériel de diffusion fera l'objet d'une seconde consultation.

2. Pièces contractuelles

Les pièces contractuelles sont les suivantes :

Pièces particulières :

- Le présent cahier des charges ;
- Une note d'intention (annexe1) ;
- Le bordereau des prix unitaires (annexe 2) ;
- Acte d'engagement (annexe 3).

Pièces générales :

- Les documents applicables sont ceux en vigueur au premier jour du mois d'établissement des prix, tel que ce mois est défini au présent contrat
- Le CCAG Fournitures courantes et services tel qu'approuvé par l'arrêté du 19 Janvier 2009

3. Modalités de consultation

Le présent document est envoyé à une sélection de trois sociétés minimum choisies par Le voyage à Nantes comme étant susceptibles de fournir un/des outil(s) répondant à ses attentes en matière de qualité de réalisation, de robustesse, d'ergonomie et de respect des délais.

Il est demandé à ces sociétés de répondre par un dossier de candidature et d'offre présentant leurs capacités à intégrer une solution correspondant au besoin. Le candidat devra obligatoirement visiter les lieux afin de concevoir une réponse prenant en compte tant l'ambiance générale du musée que les contenus audiovisuels préexistants.

Un rendez-vous préalable devra être effectué entre le 16 et le 20 janvier pour de plus amples explications sur le projet.

3.1 La composition du dossier

Le titulaire devra fournir, dans sa réponse :

- Une présentation de la société (capacité technique, financière, humaine) ;
- Une présentation de la solution proposée, des orientations scénaristiques, de la conception générale envisagée ;
- Le bordereau des prix unitaires dûment rempli ([Annexe2](#)) ;
- Des références récentes dans des équipements culturels similaires au Château des

- ducs de Bretagne ;
- Un planning indiquant les différentes étapes de conception et de réalisation et notamment :
 - La signature des divers contrats ;
 - La phase d'échange autour de la définition des scénarios d'utilisation et des suggestions de navigation ;
 - La conception de maquettes graphiques ;
 - Les étapes de validation ;
 - Le développement informatique de l'application ;
 - Le suivi du démarrage d'exploitation.

Le soumissionnaire indiquera les contraintes de chaque phase ainsi que leurs besoins en matière de personnel spécialisé du site (temps nécessaire, profil, période).

Une rencontre aura lieu après le choix du prestataire pour mettre en commun le planning qui tiendra compte des contraintes du château et du soumissionnaire.

Ce dispositif muséal sera présenté au public au plus tard le 01/05/2014.

3.2 Le jugement des offres

Les critères retenus pour le jugement des offres sont indiqués ci-dessous et pondérés de la manière suivante :

1- Valeur technique (70 %) :

Elle sera appréciée en fonction des éléments fournis dans les documents de réponse en ce qui concerne :

- L'approche méthodologique ;
- La composition des équipes ;
- La pertinence de la proposition artistique par rapport au parcours ;
- L'adéquation de la proposition de concept avec les impératifs de médiation du musée ;
- Les grands principes d'ergonomie et d'accès à l'information.

2- Prix des prestations (30 %)

Il sera apprécié sur la base du BPU dûment rempli, annexé au présent document.

L'appréciation des offres sera quantifiée par l'attribution d'une note chiffrée pour chacun des critères de jugement. Le classement sera ensuite effectué en fonction de la note finale obtenue par chacune des offres. La note finale étant la somme des notes obtenues pour chacun des critères auxquelles on attribue le pourcentage qui y correspond.

Les trois sociétés minimum choisies par Le voyage à Nantes devront remettre leurs offres avant le 20 février 2012 à 15h par courrier ou courriel :

Château des ducs de Bretagne,
À l'attention de Christophe Courtin,
4 Place Marc Elder
44 000 Nantes
christophe.courtin@chateau-chateau.fr

Une audition des candidats aura lieu le 22/02/2012. Ils auront la possibilité de venir présenter leur projet à l'équipe du château lors d'une session d'une durée maximale de

1h30. Prendre rendez-vous avec Christophe Courtin : 02 51 17 49 05.

4. Modalités d'exécution

4.1 Délais d'exécution

Les délais d'exécution seront établis d'un commun accord entre le Château des ducs de Bretagne et le prestataire choisi. L'application finale devra être opérante selon un calendrier qui sera défini entre le Château des ducs de Bretagne et le prestataire selon l'échéancier suivant :

- Livraison d'une application pour le démonstrateur mobile pour le 31/12/2012 au plus tard ;
- Mise en service de l'application finale dans le musée au cours du premier semestre 2014.

4.2 Modalités de réception

Il sera livré au musée d'histoire de Nantes :

- 1) La version finale du logiciel débuggé développé pour fonctionner (*a minima*) sous un système d'exploitation Windows 7 ;
- 2) Le code source dans son intégralité ou à défaut, l'ensemble des briques logicielles permettant d'apporter des modifications à l'application ;
- 3) Une notice d'utilisation et de configuration du logiciel précédemment mentionné ;
- 4) L'ensemble, en version numérique et papier des documents relatifs aux hypothèses de travail, choix techniques, conceptuels et ergonomiques adoptés, maquettes graphiques, ainsi que tout document jugé nécessaire par la maîtrise d'ouvrage au cours de la prestation ;
- 5) Un cahier des charges précisant les conditions d'installation du dispositif muséal final ;
- 6) Un prototype de démonstration (voir Annexe1) fonctionnel exploitant le logiciel mentionné au point 1) ;
- 7) Un contrat de cession des droits d'exploitation de l'application sans limitation de durée (ou dans la limite imposée par la législation en vigueur).

Il est à noter que le prestataire n'est pas tenu de fournir le matériel inhérent à la mise en place du dispositif muséographique final. Cependant, il devra faire des prescriptions de matériel à utiliser pour le dispositif muséal ainsi que pour la base de données en ligne.

4.3 Garantie

Une vérification de service régulier (tests de validité de fonctionnement) sera effectuée dans les 3 mois à compter de la mise à disposition du public. Le prestataire s'engage à effectuer, durant les 6 mois à compter de la fin de cette vérification, les correctifs éventuels ainsi que la maintenance de l'application qui aura été livrée.

5. Description des prestations

Validations : le château sera étroitement impliqué dans l'ensemble du processus de production. Il validera notamment les différentes étapes de conception, de scénarisation, d'ergonomie, les choix techniques, le design graphique et les différentes opérations de post-production.

Dispositions générales :

Cette application est destinée à valoriser la maquette du port de Nantes de manière interactive tout en permettant à l'utilisateur d'accéder à des informations préalablement répertoriées. La prestation doit tenir compte des intentions du musée, décrites de manière non exhaustive en annexe 1.

En outre, le prestataire devra s'acquitter de la mise en place du dispositif final dans le musée, ainsi que de la configuration et des réglages éventuels lors de la mise à disposition du public qui interviendra au premier semestre 2014.

Aspect linguistique :

Conformément à la charte du musée, il est impératif que l'application soit au minimum développée dans trois langues que sont le français, l'anglais et l'espagnol.

Standards techniques attendus :

- ➔ Une version « 1.0 » (débuggée) de l'application fonctionnant sous Windows 7. Une attention toute particulière sera attachée au type de licence envisagé et aux technologies informatiques employées. Les propositions intégrant une licence libre et une solution *multiplateforme* seront particulièrement appréciées car en phase avec la philosophie du projet.
- ➔ 1 DVD de données techniques rassemblant l'ensemble des maquettes graphiques et autres documents dactylographiés liés à la conduite du projet.

6. Prix / modalités de détermination du prix

6.1 Prix

Unité monétaire : La monnaie de compte du contrat est l'Euro .

6.2 Conditions générales de l'offre des prix

Le prix des prestations sera déterminé en fonction des offres remises et après négociation avec l'ensemble des soumissionnaires.

Les prix sont établis dans les conditions économiques en vigueur au mois M0 fixé au mois de la remise des offres en fonction du bordereau des prix unitaires annexé au présent cahier des charges dûment rempli.

6.3 Révision des prix

Les prix sont fermes sur la durée du contrat.

7. Modalités de facturation

7.1 Paiement

Le paiement des sommes dues intervient, après vérification du service fait.

7.2 Présentation de la facture

La facture est établie, en un original et une copie libellée au nom du musée et comporte outre les mentions légales, te les indications suivantes :

- Le numéro d'identification professionnelle du prestataire (Siret),
- Le numéro de T.V.A. intracommunautaire,
- La référence du présent contrat,
- L'élément de mission réalisé,
- Le montant hors taxes des prestations réalisées,
- Le taux et le montant de la T.V.A.,
- Le montant toutes taxes comprises.

7.3 Remise de la facture

La facture est transmise en envoi recommandé ou déposée contre récépissé à l'adresse suivante :

*Le Voyage à Nantes — Château des ducs de Bretagne
Service nouvelles technologies
4, place Marc Elder
44000 Nantes*

7.4 Paiement

Le paiement sera échelonné de la manière suivante :

- 30% à mi-parcours de la phase de conception ;
- 30% lors de la validation des scénarios d'utilisation et des maquettes graphiques ;
- 40% à la livraison de l'application finale.

Le défaut de paiement dans le délai prévu ci-dessus fait courir de plein droit et sans autre formalité, au bénéfice du titulaire, des intérêts moratoires. Le taux des intérêts moratoires est égal au taux d'intérêt de la principale facilité de refinancement appliquée par la Banque centrale européenne à son opération de refinancement principal la plus récente effectuée avant le premier jour de calendrier du semestre de l'année civile au cours duquel les intérêts moratoires ont commencé à courir, majoré de sept points.

La société d'affacturage à laquelle le titulaire déciderait de recourir dans le cadre de la

présente commande doit obligatoirement respecter les dispositions contractuelles de la commande, notamment celles relatives aux conditions de paiement. Il appartient au titulaire de veiller à la stricte application des clauses contractuelles.

7.5 Résiliation

Dans l'hypothèse où le prestataire manquerait de façon répétée à ses obligations contractuelles, le musée peut résilier le contrat aux torts du prestataire dans les conditions prévues au chapitre VI du CCAG/FCS.

En cas d'inexactitude des renseignements mentionnés en page 26 du présent contrat, le musée peut résilier le contrat aux torts du prestataire.

Enfin, après mise en demeure restée infructueuse, en application de l'article X du présent contrat, le contrat peut être résilié aux torts du titulaire sans que celui-ci puisse prétendre à indemnité et, le cas échéant, avec exécution des prestations à ses frais et risques, lorsqu'il a contrevenu à l'article D8222-5 du code du travail. La mise en demeure est notifiée par écrit et assortie d'un délai. A défaut d'indication du délai, le prestataire dispose d'un mois à compter de la notification de la mise en demeure pour satisfaire aux obligations de celle-ci ou pour présenter ses observations.

7.6 Sous-traitance

Si le prestataire décide de sous-traiter des prestations, il ne peut le faire qu'auprès de prestataires qui ont été agréées par le musée avant le début des prestations et dont les conditions de paiement ont été acceptées et disposant des agréments nécessaires.

Toutes les pièces afférentes aux factures seront établies en un original et deux copies portant, outre les mentions légales, les indications suivantes :

- Nom et adresse du créancier,
- Intitulé et numéro du compte bancaire ou postal à créditer ;
- Date et numéro du contrat ;
- Prestation exécutée ou livrée avec indication, pour chaque prestation, des références du bon de commande s'y rapportant ;
- Copie de la (ou des) facture(s) des matériels acquis par le TITULAIRE pour l'exécution du présent contrat pour les matériels non inclus dans le forfait ;
- Montant hors TVA de la prestation exécutée ;
- Taux et montant de la TVA ;
- Montant total toutes taxes comprises ;
- Date de facturation ;
- Répartition des paiements par prestataire, en cas de groupement ou de sous-traitance.

Les montants des sommes versées au TITULAIRE sont calculés en appliquant le taux de T.V.A. en vigueur lors de l'établissement des pièces de mandatement.

8. Documents à remettre

Attestations de l'article D 8222-5 du code du travail

Le prestataire doit communiquer au musée, à la demande de ce dernier, tous les 6 mois

jusqu'à la fin de l'exécution du contrat, les attestations suivantes :

- Une attestation de fournitures de déclarations sociales émanant de l'organisme de protection sociale chargé du recouvrement des cotisations et des contributions sociales incombant au prestataire ;
- Une attestation sur l'honneur du dépôt auprès de l'administration fiscale, à la date de l'attestation, de l'ensemble des déclarations fiscales obligatoires et le récépissé du dépôt de déclaration auprès d'un centre de formalités des entreprises lorsque le candidat n'est pas tenu de s'immatriculer au registre du commerce et des sociétés ou au répertoire des métiers et n'est pas en mesure de produire les documents mentionnés au a) ou au b) du 2° ;
- Lorsque le cocontractant emploie des salariés, une attestation sur l'honneur établie par ce cocontractant de la réalisation du travail par des salariés employés régulièrement au regard des articles L. 1221-10, L. 3243-2 et R. 3243-1 du code du travail.

9. Changement dans la structure de l'entreprise

Le prestataire doit obligatoirement notifier au musée tout changement concernant l'identification du prestataire (ex : raison sociale ou dénomination sociale, siège social,...) ainsi que toute modification ayant pour effet de substituer à la personne morale signataire du présent contrat une entité juridique différente ou d'entraîner un changement de contrôle de la société. Le musée se réserve le droit de résilier, dans un délai de 2 mois après cette notification, le présent contrat sans être tenu au paiement d'une indemnité. Il est de même de tout projet de fusion et d'absorption. Cette clause étant une condition expresse, toute inobservation peut entraîner la résiliation immédiate du contrat sur simple notification par lettre recommandée sans autre formalité et indemnité.

Redressement ou liquidation judiciaire

Le prestataire doit obligatoirement informer le musée dès le prononcé du tribunal de toute procédure de redressement ou de mise en liquidation judiciaire dont son entreprise fait l'objet. Le prestataire transmet par la suite au musée la copie du ou des jugements prononcés à cet effet. Cette clause étant une condition expresse, toute inobservation peut entraîner la résiliation immédiate du contrat sur simple notification par lettre recommandée sans autre formalité et indemnité.

10. Durée du contrat

Le contrat débutera au moment de sa conclusion et prendra fin au terme de l'accomplissement de l'ensemble des prestations décrites par le présent document.

11. Juridiction compétente

Tout recours concernant la présente procédure devra être adressé à la juridiction suivante :

Tribunal de commerce
2 bis Quai François Mitterrand

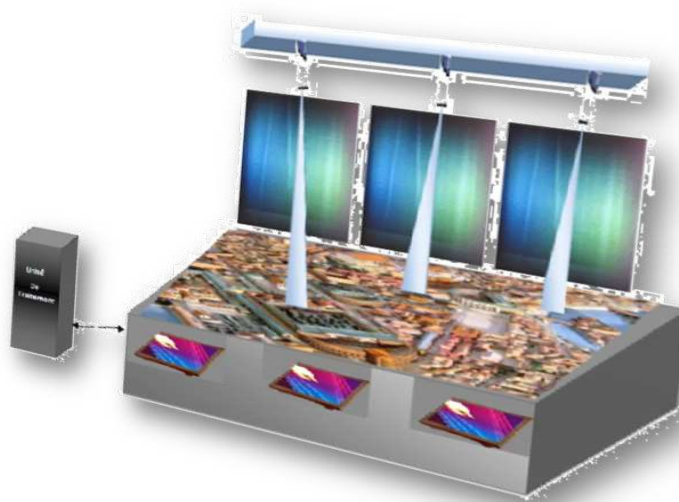
B.P 86209 F-44262 Nantes Cedex 2

Annexe 1 : Note d'intention

L'intérêt majeur du dispositif muséal envisagé est de **valoriser** de manière **interactive** un objet de la collection du musée d'Histoire de Nantes à partir d'un corpus de données historiques **évolutif**.

Le dispositif final intégrera ainsi différents éléments :

- La maquette physique du port de Nantes en 1900 ;
- Des écrans LCD tactiles multipoints d'environ 40 pouces (3 dans un premier temps, et éventuellement plus par la suite) ;
- Un serveur contenant une version de la base de données (cf ci-après), et sur lequel tournera l'application finale ;
- Un dispositif de pointage lumineux (des pointeurs ou des vidéo-projecteurs) asservi en commande par l'application nommée ci-dessus et permettant d'illustrer le dialogue en créant une interaction entre l'utilisateur, les données, et la maquette physique. Ce dispositif permettra à l'utilisateur de situer sur la maquette physique les éléments sélectionnés dans l'environnement virtuel.



Explications concernant la base de connaissances :

Une base de données a été conçue spécialement — dans le cadre d'un partenariat avec des établissements d'enseignement supérieur de la région Nantaise — pour répondre à ce besoin d'un modèle de connaissances évolutif et participatif.

Ainsi, le volume d'informations n'est pas figé comme dans la plupart des dispositifs existant, mais sera amené à être enrichi au fil des contributions futures de chercheurs ou d'informateurs « lambda ».

Détails techniques :

La base de données est de type Postgres, à laquelle s'ajoute un cartouche PostGIS pour la gestion de données géoréférencées.

Les données de la base peuvent être sous différentes formes :

- Des données « objet » symbolisant des entités géoréférencées présentes sur la maquette physique, ou des entités conceptuelles liées aux entités géoréférencées ;

- Des données « ressources » (textuelles ou graphiques).

Chaque objet ou ressource est présent dans la base de données sous la forme d'une « notice » dont la structure ne varie que pour les différentes ressources et entre les objets et les ressources.

Ces données sont liées entre elles par des « relations », c'est à dire que chaque objet ou ressource est lié à différents autres éléments par des relations spécifiques (relation de type « historique », « documentaire », « d'appartenance », etc.) permettant d'enrichir le discours au moyen de liens thématiques, géographiques, temporels.

Dispositions générales à intégrer

La navigation via l'application — objet du présent cahier des charges — doit ainsi pouvoir s'effectuer de différentes manières (thématique, temporelle, géographique, etc.), traduisant au mieux les liens possibles entre les données et la maquette elle-même. **La question des scénarios d'utilisation et du design d'interactivité sera ainsi au cœur de la conception de l'application et une attention toute particulière sera portée sur ce point.** Le caractère intuitif de l'interface graphique doit être en adéquation avec les critères d'accessibilité et les fonctions inhérentes à l'activité du musée.

En ce qui concerne la sélection géographique, l'application devra permettre à l'utilisateur d'**accéder à des niveaux d'information différents** selon la zone sélectionnée (bâtiment, groupe de bâtiments ou zones géographiques étendues).

Nous disposons par ailleurs d'un modèle numérique 3D issu du scan de la maquette physique qui pourra être intégré au dispositif.

Une grande importance devra ainsi être accordée à la question de la manipulation des données, en intégrant une gestion du « multi-touch », ainsi que la possibilité de navigation par plusieurs utilisateurs en même temps sur le dispositif.

Il s'agira ainsi de fournir des conseils et des suggestions de disposition pour répondre à cette problématique : découpage géographique par dalle, affichage dupliqué sur chacune des dalles, communication entre les dalles, etc.

L'application doit également tenir compte du caractère évolutif du dispositif et donc s'adapter à l'enrichissement progressif de la base de données.

Prototype de démonstration

Une maquette de taille réduite (1,30m²) représentant un quartier spécifique de la ville de Nantes (quartier Saint-Similien) servira à la réalisation d'un prototype mobile, dont le but sera à la fois de tester les hypothèses de travail, mais également de promouvoir par la suite le projet lors de salons ou de conférences. Les données relatives à cette maquette seront également stockées dans la base de données mentionnée précédemment, mais dans une quantité moindre comparé au dispositif final.

Ce prototype fait partie intégrante de la prestation demandée et devra être fonctionnel pour le 31/12/2012.

Annexe 2 : Bordereau de prix

Désignation	Prix / Jour	Nombre de jours	Prix HT	Prix TTC
1. Scénarisation				
2. Étude ergonomique				
3. Conception graphique				
4. Développement informatique				
5. Déplacements (réunions, etc.)				
TOTAL				

Annexe 3 : Acte d'engagement

Le présent cahier des charges comporte 16 feuilles numérotées de 1 à 16.

Contrat conclu en application des articles 26-II et 28 du Code des marchés publics (décret n°2006-975 du 1er août 2006).

Entre les soussignés :

Nom de la Société : **SPL LE VOYAGE A NANTES**

Adresse : **1-3 rue Crucy — BP 92211
44022 Nantes cedex 1**

Représentée par son Directeur Général, **Jean BLAISE**

Au nom du musée : **Musée d'Histoire de Nantes**

situé : **Château des ducs de Bretagne**

Adresse : **4 place Marc Elder – 44000 Nantes**

Représenté par son Directeur, **Bertrand GUILLET**

Ci-après dénommé le musée,

d'une part,

Et

La société :

Dont le siège social est situé :

représentée par (1) :

en qualité de :

ci-après dénommée le « **prestataire** »,

d'autre part,

(1) Joindre le pouvoir.

Immatriculé(e) à l'INSEE/ou similaire

Numéro d'identité établissement (SIREN)

Numéro SIRET

Code d'activité économique principal (APE)

Numéro d'identification

Après avoir pris connaissance et accepté l'ensemble des pièces constitutives du cahier des charges, je m'engage (ou engage le groupement dont je suis le mandataire) sans réserve, conformément aux stipulations des documents visés ci-dessus, à exécuter les prestations dans les conditions ci-après définies, l'offre ainsi présentée ne (me) (nous) liant toutefois que si son acceptation (m'est) (nous est) notifiée dans un délai de 90 (quatre-vingt dix) à compter de la date de remise de l'offre.

ENGAGEMENTS DU PRESTATAIRE (DES MEMBRES DU GROUPEMENT) ET, LE CAS ECHEANT, DU OU DES SOUS-TRAITANT(S)

Le prestataire atteste sur l'honneur :

- qu'il a satisfait à ses obligations sociales et fiscales au 31 décembre 2010 ;
- qu'il ne fait pas l'objet d'une interdiction de concourir à un marché public ;
- qu'il n'a pas fait l'objet, depuis moins de cinq ans, d'une condamnation inscrite au bulletin n°2 du casier judiciaire pour les infractions mentionnées aux articles L. 8221-1, L. 8221-3, L. 8221-5, L. 8251-1, L. 8252-2, L. 8252-3, L. 8231-1 et L. 8241-1 du Code du travail ;
- que le travail est réalisé avec des salariés employés régulièrement au regard des articles L. 1221-10, L. 1221-13, L. 1221-15, L. 3243-1, L. 3243-2, L. 3243-4, et D. 8222-5 du Code du travail ;
- qu'il a satisfait aux obligations concernant l'emploi des travailleurs handicapés, mutilés de guerre et assimilés visées par les articles L. 5212-1 à L. 5212-12 du Code du travail ;
- qu'il n'a pas fait l'objet, depuis moins de cinq ans, d'une condamnation définitive pour l'une des infractions prévues par les articles 222-38, 222-40, 313-1 à 313-3, 314-1 à 314-3, 324-1 à 324-6, 421-2-1, par le deuxième alinéa de l'article 421-5, par l'article 433-1, par le deuxième alinéa de l'article 434-9, par les articles 435-2, 441-1 à 441-7, par les premier et deuxième alinéas de l'article 441-8, par l'article 441-9 et par l'article 450-1 du code pénal, ainsi que par l'article 1741 du code général des impôts.

Le prestataire s'engage à fournir au moment de la notification une attestation d'assurance en cours de validité couvrant les risques professionnels pendant la durée du contrat, s'il ne l'a pas fournie avec le dossier de candidature ou si la date de validité de celle remise à ce stade de la procédure est caduque.

Publications personnelles

- BILLEN, R., CARRÉ, C., DELFOSSE, V., HERVY, B., LAROCHE, F., LEFÈVRE, D., SERVIÈRES, M. et VAN RUYMBEKE, M. (2012). 3D historical models: the case studies of Liege and Nantes. *In COST Action TU0801 workshop on Semantic Enrichment of 3D city models for sustainable urban development*, Madrid.
- HERVY, B. (2013). Modélisation et capitalisation des connaissances au service du patrimoine culturel. Application à la maquette du port de Nantes en 1900. *In 4ème Forum d'histoire des sciences et techniques de la mer et du littoral*.
- HERVY, B., BILLEN, R., LAROCHE, F., CARRÉ, C., SERVIÈRES, M., VAN RUYMBEKE, M., TOURRE, V., DELFOSSE, V. et KEROUANTON, J.-L. (2012a). A generalized approach for historical mock-up acquisition and data modelling: Towards historically enriched 3D city models. *In LEDUC, T., MOREAU, G. et BILLEN, R., éditeurs : Usage, Usability, and Utility of 3D City Models – European COST Action TU0801*, page 02009, Les Ulis, France. EDP Sciences.
- HERVY, B. et COURTIN, C. (2013). L'utilisation des technologies numériques au musée d'histoire de Nantes. *Musées et collections publiques de France*, 2(268):57–60.
- HERVY, B., LAROCHE, F. et BERNARD, A. (2012b). An information system for driving the future plm for museum: the DHRM, Digital Heritage Reference Model. *In ASME 2012 11th Biennial Conference On Engineering Systems Design And Analysis - ESDA 2012*, Nantes, France.
- HERVY, B., LAROCHE, F., BERNARD, A. et KEROUANTON, J.-L. (2013). Co-working for knowledge management in cultural heritage: towards a PLM for museum. *In IFIP WG5.1 10th International Conference On Product Lifecycle Management*, Nantes, France.
- HERVY, B., LAROCHE, F., KEROUANTON, J.-L. et BERNARD, A. (2012c). Advanced virtual reality visualisation systems based on a meta-model dedicated to historical knowledge. *In 3rd IEEE International Conference on Cognitive Infocommunications (CogInfoCom 2012)*.
- HERVY, B., LAROCHE, F., KEROUANTON, J.-L. et BERNARD, A. (2012d). Projet Nantes1900 : les nouvelles technologies au service de la capitalisation des connaissances et de la valorisation du patrimoine historique. *In Colloque " Patrimoine et humanités numériques : quelles formations ? "*, page 13 p., Paris, France.
- HERVY, B., LAROCHE, F., KEROUANTON JLK, J.-L., BERNARD, A., COURTIN, C., D'HAENE, L., GUILLET, B. et WAELS, A. (2014a). Augmented historical scale model for museums: from curation to multi-modal promotion. *In Laval Virtual VRIC 14*, Laval, France.
- HERVY, B., LAROCHE, F., LAM, B., TOURRE, V., SERVIÈRES, M., KEROUANTON, J.-L. et BERNARD, A. (2014b). Historical Knowledge Management Through Virtual Reality: Theoretical Aspects and Experiment Proposal. *In Digital Intelligence*.

- KEROUANTON, J.-L. et HERVY, B. (2014). Nantes en 1900. Histoire et technique du port et de la ville, à partir de la maquette de Duchesne au musée du Château des ducs de Bretagne. *In Nantes et le pays nantais. Congrès de Nantes de la société d'histoire et d'archéologie de Bretagne.*, volume XCII, pages 139–147.
- LAROCHE, F., HERVY, B., COURTIN, C., KEROUANTON, J.-L., GUILLET, B. et BERNARD, A. (2013). From heritage knowledge capitalization to cultural mediation thanks to augmented digital technologies. Experimentation at the Museum of Nantes History. *In 15th International Conference and Exhibition on Virtual Reality & Converging Technologies.*
- LAROCHE, F., LEFÈVRE, D., SERVIÈRES, M., HERVY, B. et BERNARD, A. (2012). Intelligent Reverse-Engineering Segmentation: Automatic Semantic Recognition of Large 3D Digitalized Cloud of Points Dedicated to Heritage Objects. *In ASME 2012 11th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis*, Nantes, France. [73](#), [77](#), [99](#), [137](#)
- MA, N., LAROCHE, F., HERVY, B. et KEROUANTON, J.-L. (2013). Virtual conservation and interaction with our cultural heritage: Framework for multi-dimension model based interface. *In Digital Heritage*, Marseille, France.

Bibliographie

- ALLANIC, M. (2014). Managing heterogeneous data in bio-medical imaging field through PLM and graph visualisation approaches. *In IFIP WG5.1 11th International Conference On Product Lifecycle Management*, pages 1–13. [82](#)
- ALLEN, J. (1983). Maintaining knowledge about temporal intervals. *Communications of the ACM*. [77](#)
- ALLINSON, J. (2006). OAIS as a reference model for repositories. Rapport technique, UKOLN. [40](#)
- ALTSHULLER, G. (1997). *40 principles: TRIZ keys to innovation*. Technical Innovation Center, Inc. [69](#)
- AMMAR-KHODJA, S. (2007). *Processus d'aide à la spécification et à la vérification d'application d'ingénierie à base de connaissances expertes*. Thèse de doctorat, École Centrale de Nantes. [45](#)
- ARDANS (2011). Ardans Knowledge Maker : Introduction , principes et philosophie implantés dans cet environnement de gestion des connaissances. Rapport technique 0. [46](#), [74](#)
- ASSOUROKO, I., DUCCELLIER, G., EYNARD, B. et BOUTINAUD, P. (2012). Semantic Relationship Based Knowledge Management and Reuse in Collaborative Product Development. *In RIVEST, L., BOURAS, A. et LOUHICHI, B., éditeurs : IFIP WG 5.1 International Conference, PLM 2012*, volume 388 de *IFIP Advances in Information and Communication Technology*, pages 1–13, Berlin, Heidelberg. Springer Berlin Heidelberg. [82](#)
- AUBER, D., CHIRICOTA, Y., DELEST, M., MELANÇON, G., DOMENGER, J. et MARY, P. (2007). Visualisation de graphes avec Tulip: exploration interactive de grandes masses de données en appui à la fouille de données et à l'extraction de connaissances. *In EGC'07: Extraction et Gestion de Connaissances*, Namur, Belgique. [76](#)
- BACH THANH, L. (2006). *Construction d'un Web sémantique multi-points de vue*. Thèse de doctorat, MinesParisTech. [52](#), [56](#)
- BACHIMONT, B. (2004a). *Arts et sciences du numérique: Ingénierie des connaissances et critique de la raison computationnelle*. Mémoire hdr, Université de technologie de Compiègne. [41](#)
- BACHIMONT, B. (2004b). Pourquoi n'y at-il pas d'expérience en ingénierie des connaissances ? *In Journées francophones d'ingénierie des connaissances*. [41](#)
- BACHIMONT, B. et CROZAT, S. (2004). Instrumentation numérique des documents: pour une séparation fonds/forme. *Information-Interaction-Intelligence*. [41](#)
- BALDISSINI, S., MANFERDINI, A. et MASCI, M. (2009). An information system for the integration, management and visualization of 3d reality based archaeological models from different operators. *In 3rd ISPRS International Workshop 3D-ARCH*. [49](#), [61](#)
- BASTIAN, M., HEYMANN, S. et JACOMY, M. (2009). Gephi: an open source software for exploring and manipulating networks. *ICWSM*. [11](#), [113](#), [114](#)

- BEN SAID, Z. (2012). *A virtual reality-based approach for interactive and visual mining of association rules*. Thèse de doctorat. 130
- BENHAMOU, F. et THESMAR, D. (2011). Valoriser le patrimoine culturel de la France. Rapport technique. 33
- BENNES, L. (2013). Vers une méthodologie de développement d'outils de réalité virtuelle pour faciliter la convergence métiers en conception de produits centrée sur l'homme. 130
- BENOIT, S., KILOUCHI, S., MICHEL, A. P. et POUYLLAU, S. (2010). Usines 3D. La simulation pour questionner les sources et les vestiges de l'histoire industrielle. In *Virtual Retrospect 2009*, volume 4 de *Archéovision*, pages 31–40, Pessac. Laboratoire d'histoire économique, sociale et des techniques - LHEST, Centre national pour la numérisation de sources visuelles - CN2SV, Centre Alexandre Koyré - Centre de Recherche en Histoire des Sciences et des Techniques - CAK-CRHST, Editions Ausonius. 61
- BERETTA, F. et VERNUS, P. (2012). Le projet SyMoGIH et la modélisation de l'information : une opération scientifique au service de l'histoire. *Les Carnets du LARHRA*, (1):81–107. 54
- BERNARD, A., LAROCHE, F. et DACUNHA, C. (2009). Models and methods for knowledge formalisation in a PLM context. In *3rd International Congress Design and Modelling of Mechanical Systems*. 47
- BERNERS-LEE, T. (2001). The semantic web. *Scientific American*, 284(5):28–37. 51
- BERZAK, Y., RICHTER, M., EHRLER, C. et SHORE, T. (2011). Information Retrieval and Visualization for the Historical Domain. *Theory and Applications of Natural Language Processing*, pages 197–212. 54, 73
- BILLEN, R., BLAIN, P., DONNEAU, O., HABRAKEN, S., RENOTTE, Y. et VAN RUYMBEKE, M. (2009). Virtual model of the city of Liège in the eighteen century - "Virtual Leodium". In VERLY, J., éditeur : *Proceedings of 3D Stereo MEDIA 2009, International 3D Stereo Film and Technology Festival (3D Stereo MEDIA)*, Liège. 49, 94
- BLANCHARD, J., PINAUD, B., KUNTZ, P. et GUILLET, F. (2007). A 2D-3D visualization support for human-centered rule-mining. *Computer and Graphics*, 31(3):350–360. 138
- BONNOT, T. (2002). *La vie des objets*. Éditions de la Maison des sciences de l'homme, Paris. 47
- BOUCHON-MEUNIER, B. (1995). *La logique floue et ses applications*. 43
- BOWMAN, D. (1997). Travel in immersive virtual environments: An evaluation of viewpoint motion control techniques. In *Proceedings of IEEE 1997 Annual International Symposium on Virtual Reality*. 130
- BOWMAN, D., COQUILLART, S., FROELICH, B., HIROSE, M., KITAMURA, Y., KIYOKAWA, K. et STUERZLINGER, W. (2008). 3d user interfaces: New directions and perspectives. *Computer Graphics and Applications*, 28(6):20–36. 130
- BRAUDEL, F. (1969). *Ecrits sur l'histoire*. Flammarion. 68
- CHAMPION, E. (2011). Playing with the Past. In *Playing with the Past*, Human-Computer Interaction Series, pages 129–155. Springer London, London. 47, 130
- CHAMSEDDINE, Z. (2011). *Modélisation spatio-temporelle multi-échelle des données dans un SIG urbain*. Thèse de doctorat, LUNAM Université, École Centrale de Nantes, CERMA lab. 49

- CHEVRIER, C., JACQUOT, K. et PERRIN, J.-P. (2010). 3D modelling of a town scale model. *In Third International Conference EuroMed 2010 dedicated on Digital Heritage.*, pages 99–107, Limassol. Marinos Ioannides, Dieter Fellner, Andreas Georgopoulos, Diofantos G. Hadjimitsis (eds.). 77, 94, 99
- COLLECTIF (2013). Principles of Seville. Rapport technique. 38, 141
- CONSULTATIVE COMMITTEE FOR SPACE DATA SYSTEMS (2012). Reference Model for an Open Archival Information System (OAIS). Rapport technique June. 9, 40, 41
- CORBY, O., DIENG-KUNTZ, R., GANDON, F. et FARON-ZUCKER, C. (2006). Searching the semantic web: Approximate query processing based on ontologies. *Intelligent Systems*, 21(1):20–27. 51
- CORDIER, J.-P., DESSAJAN, S. et EIDELMAN, J. (2011). Une culture scientifique et technique au service d'une co-construction des savoirs. *La Lettre de l'OCIM*, (126):28–35. 60
- COTTE, M. (2009). Les techniques numériques et l'histoire des techniques. Le cas des maquettes virtuelles animées. *Documents pour l'histoire des techniques*, (18):7–21. 45, 47, 61, 94
- COTTE, M. (2010). La génétique technique a-t-elle un avenir comme méthode de l'histoire des techniques ? *In REY, A.-L., éditeur : Méthode et Histoire, journées d'études de la SFHST, Lille, 2007*, pages 187–201, Paris. publications de la SFHST. 41, 50
- COTTE, M. (2012). World Heritage, concepts and criteria. *In DOUET, J., éditeur : Industrial Heritage Re-tooled. The TICCIIH guide to Industrial Heritage Conservation*, chapitre 23, pages 167–173. Carnegie Publishing. 34, 37
- COTTE, M. et DENIAUD, S. (2005). CAO et patrimoine. Perspectives innovantes. *L'archéologie industrielle en France*, pages 32–28. 94
- COTTE, M., LAROCHE, F. et BERNARD, A. (2008). Les outils de réalité virtuelle sont-ils applicables au patrimoine technique et industriel ? *Historiens et géographes*, 401:245–255. 130
- CROFTS, N., DIONISSIADOU, I., DOERR, M. et STIFF, M. (1999). Définition du Modèle Conceptuel de Référence du CIDOC (CRM). Rapport technique. 9, 55
- CROZAT, S. et BACHIMONT, B. (2004). Réinterroger les structures documentaires : de la numérisation à l'informatisation. *Information - Interaction - Intelligence*, 4(1). 41
- DAUMAS, M. (1978). *Les bâtiments à usage industriel aux XVIIIe et XIXe siècle en France*. Centre de documentation d'histoire des techniques, Paris. 42
- DAVALLON, J. (2002). Comment se fabrique le patrimoine ? *Sciences humaines. Hors série 36*, (36):74–77. 20
- DAVIES, J., HARMELEN, F. et FENSEL, D. (2002). Towards the semantic web: ontology-driven knowledge management. 51
- DE LUCA, L., BUSAYARAT, C., STEFANI, C., VÉRON, P. et FLORENZANO, M. (2011). A semantic-based platform for the digital analysis of architectural heritage. *Computers & Graphics*, 35(2):227–241. 9, 49, 62, 74, 130
- DE LUCA, L., VÉRON, P. et FLORENZANO, M. (2005). Retro conception d'objets architecturaux basée sur une méthodologie de reconstruction hybride. *In 9e Colloque National AIP PRIMECA*, numéro 1, pages 1–9, La Plagne. 49, 61
- DESVALLÉES, A. et MAIRESSE, F. (2005). Sur la muséologie. *Culture & Musées*, 6(1):131–155. 34

- DHUIEB, M. A., LAROCHE, F., BELKADI, F. et BERNARD, A. (2014). Multi-scale enterprise knowledge structuring for context- aware knowledge restitution. *In IFIP WG5.1 11th International Conference On Product Lifecycle Management*, pages 1–10. [79](#)
- DIENG, R., CORBY, O., GANDON, F., GIBOIN, A., GOLEBIOWSKA, J., MATTA, N. et RIBIERE, M. (2001). *Méthodes et outils pour la gestion des connaissances*. Dunod, Paris. [51](#)
- DOERR, M. (2003). The CIDOC conceptual reference module: an ontological approach to semantic interoperability of metadata. *AI Mag.*, 24(3):75–92. [55](#)
- DOERR, M., GRADMAN, S., HENNICKE, S., ISAAC, A., MEGHINI, C. et VAN DE SOMPEL, H. (2010). The europeana data model (edm). *In World Library and Information Congress: 76th IFLA General Conference and Assembly*, Gothenburg. [44](#), [56](#)
- DUBÉ, P. (1995). Exposer pour voir, exposer pour savoir. *Museum International (Edition Francaise)*, 47(1):4–5. [147](#)
- EIDE, O., FELICETTI, A., ORE, C.-E. et HOLMEN, J. (2008). Encoding Cultural Heritage Information for the Semantic Web. Procedures for Data Integration through CIDOC-CRM Mapping. *In* ARNOLD, D., FRANCO, N., PLETINCKX, D. et VAN GOOL, L., éditeurs : *EPOCH Conference on OpenDigital Cultural Heritage Systems*, pages 1–7. [55](#)
- EPOCH (2009). The London Charter. Rapport technique February. [37](#), [141](#)
- ERMINE, J.-I., PAUGET, B., BERETTI, A. et TORTORICI, G. (2004). Histoire et Ingénierie des Connaissances. *In Sources et ressources pour les sciences sociales*, Paris, France. [47](#)
- EUROPEAN UNION (2014). Definition of the Europeana Data Model v5.2.5. [9](#), [56](#)
- EYNARD, B. (2005). *Gestion du cycle de vie des produits et dynamique des connaissances industrielles en conception intégrée*. Thèse de doctorat, Université de technologie de Compiègne. [50](#)
- FLEURY, P. (1997). La Rome Antique sur l'Internet. *Revue Informatique et Statistique dans les Sciences Humaines*, 33:146–162. [61](#)
- FLYNN, B. (2008). Augmented visualisation: Designing experience for an interpretative cultural heritage. *In Information Visualisation, 2008. IV'08. 12th International Conference*, pages 447 – 452. IEEE. [62](#), [130](#)
- FRISCHER, B. (2008). The Rome Reborn Project. How technology is helping us to study history. Rapport technique. [61](#)
- FRISCHER, B., ABERNATHY, D. et FAVRO, D. (2000). Virtual Reality and Ancient Rome: The UCLA Cultural VR Lab's Santa Maria Maggiore Project. *In* BARCELO, J. A., FORTE, M. et SANDERS, D. H., éditeurs : *Virtual Reality in Archaeology, British Archaeological Reports*, pages 155–162. ArcheoPress. [61](#)
- GABELLONE, F. (2009). Ancient contexts and virtual reality: From reconstructive study to the construction of knowledge models. *Journal of Cultural Heritage*, 10:e112–e117. [62](#)
- GAITATZES, A., CHRISTOPOULOS, D. et ROUSSOU, M. (2001). Reviving the past: cultural heritage meets virtual reality. *In VAST '01 Proceedings of the 2001 conference on Virtual reality, archeology, and cultural heritage*. [62](#)
- GANDON, F. et SADEH, N. (2004). Semantic web technologies to reconcile privacy and context awareness. *Web Semantics: Science, Services and Agents on the World Wide Web*, 1(3):241–260. [51](#)

- GARLATTI, S. et PRIÉ, Y. (2004). Adaptation et personnalisation dans le Web sémantique. *Interaction, Intelligence, Information*, Hors série. 52
- GILLINGS, M. (2005). The real, the virtually real, and the hyperreal: The role of VR in archaeology. *Envisioning the Past: Archaeology and the Image*. 62
- GREFFARD, N. (2013). *Visualisation Stéréoscopique et Interactive de Structures en Communautés dans des Graphes*. Thèse de doctorat, Université de Nantes. 130
- GREFFARD, N., PICAROUGNE, F. et KUNTZ, P. (2013). TempoSpring: A new immersive hands-free prototype for visualizing social networks: Demonstration paper. In *IEEE 7th International Conference on Research Challenges in Information Science (RCIS)*, pages 1–2. IEEE. 130
- GRUBER, T. (1993). A translation approach to portable ontology specifications. *Knowledge acquisition*. 55
- GUIDI, G., FRISCHER, B., DE SIMONE, M., CIOCI, A., SPINETTI, A., CAROSSO, L., MICOLI, L. L., RUSSO, M. et GRASSO, T. (2005). Virtualizing Ancient Rome: 3D Acquisition And Modeling Of A Large Plaster-Of-Paris Model Of Imperial Rome. In *Proceeding of the SPIE Videometrics VIII*, volume 5665. 61, 94
- GUILLET, B., HURON, L. et JEAN-LOUIS, K. (1999). La maquette du port de Nantes. In MANNEVILLE P, éditeur : *"Des villes, des ports : la mer, les hommes" : 124e congrès des sociétés historiques et scientifiques*, Nantes. Éditions du CTHS, 2001. 26
- HADID, S., JAUNIAU, C. et VIDAL, G. (2012). Visites, usages et disposition à l'innovation au Musée d'Histoire de Nantes. Rapport technique, LabSic - Université Paris13. 29, 128
- HALPIN, H., ZIELINSKI, D. J., BRADY, R. et KELLY, G. (2008). Exploring semantic social networks using virtual reality. *Lecture notes in computer science*, 5318:599–614. 130
- HATCHUEL, A. et WEIL, B. (2002a). C-K theory : Notions and applications of a unified design theory. In *Herbert Simon International Conference on "Design Sciences"*, pages 1–22. 112
- HATCHUEL, A. et WEIL, B. (2002b). La théorie C-K : Fondements et usages d'une théorie unifiée de la conception. In *Colloque Sciences de la conception*, pages 1–24, Lyon. 72
- HODGE, G. (2000). *Systems of Knowledge Organization for Digital Libraries: Beyond Traditional Authority Files*. 13, 48
- ICOM (2007). ICOM Statutes. 20
- ICOMOS (1996). Principles for the recording of monuments, groups of buildings and sites. Rapport technique October, Sofia. 38
- IFLA (1998). Functional requirements for bibliographic records: final report. Rapport technique. 55
- ISAKSEN, L. (2011). *Archaeology and the Semantic Web*. Thèse de doctorat, University of Southampton. 55
- JACOMY, M., HEYMANN, S., VENTURINI, T. et BASTIAN, M. (2012). ForceAtlas2, A continuous graph layout algorithm for handy network visualization. 113
- JANOWICZ, K. (2009). The role of place for the spatial referencing of heritage data. In *The Cultural Heritage of Historic European Cities and Public Participatory GIS Workshop*. 9, 57

- KERARON, Y. (2007). *Couplages entre le système documentaire et les systèmes technique et humain : Les mutations numériques*. Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes. 40, 42
- KEROUANTON, J.-L. (2009). Pour l'utilisation des SIG (systèmes d'information géographique) en histoire des techniques : entre documentation et analyse spatiale. *Documents pour l'histoire des techniques*, (18):81–94. 45
- KIRITSIS, D., BUFARDI, A. et XIROUCHAKIS, P. (2003). Research issues on product lifecycle management and information tracking using smart embedded systems. *Advanced Engineering Informatics*, 17(3):189–202. 49
- KNOBLOCK, C., SZEKELY, P., AMBITE, J. L., GOEL, A., GUPTA, S., LERMAN, K., MUSLEA, M., TAHERIYAN, M. et MALLICK, P. (2012). Semi-automatically mapping structured sources into the semantic web. In *The Semantic Web: Research and Applications*, pages 375–390. Springer Berlin Heidelberg. 81
- KOLBE, T., GRÖGER, G. et PLÜMER, L. (2005). CityGML: Interoperable access to 3D city models. *Geo-information for disaster management*. 49
- KUNTZ, P., LEHN, R., GUILLET, F. et PINAUD, B. (2006). Découverte interactive de règles d'association via une interface visuelle. *Visualisation en Extraction des Connaissances*, RNTI-E-7:113–125. 138
- LABROUSSE, M. (2004). *Proposition d'un modèle conceptuel unifié pour la gestion dynamique des connaissances d'entreprise*. Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes. 45
- LABROUSSE, M., PERRY, N. et BERNARD, A. (2004). Modèle FBS-PPR : des objets d'entreprise à la gestion dynamique des connaissances industrielles. *Gestion Dynamique des Connaissances Industrielles*. 50
- LAGOZE, C., VAN DE SOMPEL, H., NELSON, M. et WARNER, S. (2002). *The Open Archives Initiative Protocol for Metadata Harvesting, v.2.0*. 98
- LANGWEIL, D. (2008). Digitalization of Prague city, last step. 94
- LAROCHE, F. (2007). *Contribution à la sauvegarde des Objets techniques anciens par l'Archéologie industrielle avancée. Proposition d'un Modèle d'information de référence muséologique et d'une Méthode inter-disciplinaire pour la Capitalisation des connaissances du Patrimoine*. These, École centrale de nantes - ECN ; Université de Nantes. 9, 11, 12, 15, 33, 45, 47, 58, 59, 63, 69, 70, 74, 82, 88, 112, 131, 142, 151, 152, 153, 154
- LAROCHE, F., BERNARD, A. et COTTE, M. (2006). Between heritage and Industrial Engineering, a new life for old product: virtuality. In *Proceedings of Virtual Concept 2006*, pages 1–7, Mexico. 130
- LAROCHE, F., BERNARD, A. et COTTE, M. (2008). Advanced Industrial Archaeology: A new reverse-engineering process for contextualizing and digitizing ancient technical objects. *Journal Virtual and Physical Prototyping*, 3(Special Issue n°2):pp.105–122. 33, 50, 141
- LAROCHE, F. et KEROUANTON, J.-L. (2010). Creating interactivity of our heritage stored in Museums. In *VRIC 2010 - Laval Virtual*, ISBN 2-9515730-9-X, page 2, Laval, France. 61
- LAROCHE, F., KEROUANTON, J.-L. et BERNARD, A. (2010a). A case study of capitalisation and valorisation of our technical heritage. In *CIRP Design Conference*. 94
- LAROCHE, F., LE LOCH, S., COTTE, M., KEROUANTON, J.-L. et BERNARD, A. (2010b). L'histoire, un medium de didactique aux Nouvelles Technologies. *Revue Les cahiers du Centre François Viète*. 9, 61

- LAROCHE, F., LEFÈVRE, D., SERVIÈRES, M., HERVY, B. et BERNARD, A. (2012). Intelligent Reverse-Engineering Segmentation: Automatic Semantic Recognition of Large 3D Digitalized Cloud of Points Dedicated to Heritage Objects. *In ASME 2012 11th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis*, Nantes, France. 73, 77, 99, 137
- LATOUR, B. (1992). *Aramis ou l'amour des techniques*. La Decouverte. 47
- LAUBÉ, S. (2009). Modélisation des documents numériques pour l'histoire des techniques : une perspective de recherche. *Documents pour l'histoire des techniques*, (18):37–41. 41
- LE CLOAREC, M. et D'HAENE, L. (2007). Les visiteurs du musée d'histoire de Nantes. Rapport technique, Château des ducs de Bretagne - Service des publics. 28
- LE DUIGOU, J. (2010). *Cadre de modélisation pour les systèmes PLM en entreprise étendue Application aux PME mécaniciennes*. Thèse de doctorat, École Centrale de Nantes. 9, 49, 50, 51
- LUTTERS, E., DANKERS, W., OUDE LUTTIKHUIS, E. et de LANGE, J. (2014). Network based requirement specification. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 63(1):133–136. 82, 113, 137
- MABILLOT, V. (2000). *Mises en scène de l'interactivité. Représentations des utilisateurs dans les dispositifs des médiations interactives*. Thèse de doctorat, Université Lyon II. 60
- MATTA, N. et MONTICOLO, D. (2010). Capitalization of collective knowledge: from knowledge engineering, multi-agent systems to CSCW and socio semantic web. *In Collaborative Technologies and Systems (CTS), 2010 International Symposium on*, pages 13–20, Chicago. IEEE. 51
- MERONO-PENUELA, A., ASHKPOUR, A., ERP, M. V., MANDEMAKERS, K., BREURE, L., SCHARNHORST, A., SCHLOBACH, S. et HARMELEN, F. V. (2012). Semantic Technologies for Historical Research : A Survey. *Semantic Web Journal*, pages 1–26. 56
- MICHEL, A. P. (2009). La reconstitution virtuelle d'un atelier de Renault-Billancour : sources, méthodologie et perspectives. *Documents pour l'histoire des techniques*, (18):23–36. 61
- MURPHY, M., MCGOVERN, E. et PAVIA, S. (2013). Historic building information modelling (HBIM). *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 76:89 – 102. 49
- NAEGEL, P.-a. (2011). Modèles et réalité - Le cas du port de Nantes. 26
- NICOLESCU, B. (1996). *La transdisciplinarité*. Editions du rocher. 95
- NOËL, F. et ROUCOULES, L. (2008). The PPO design model with respect to digital enterprise technologies among product life cycle. *International Journal of Computer Integrated . . .* 50
- NONAKA, I. (1994). A dynamic theory of organizational knowledge creation. *Organization science*, 5(1):14–37. 46
- NONAKA, I. et TAKEUCHI, H. (1995). *The knowledge-creating company: How Japanese companies create the dynamics of innovation*. Oxford University Press. 46
- NUESSLI, M.-A. et KAPLAN, F. (2014). Encoding metaknowledge for historical databases. *In Digital Humanities 2014*, Lausanne. 56
- PARENT, C., SPACCAPIETRA, S. et ZIMÁNYI, E. (2006). *Conceptual Modeling for Traditional and Spatio-Temporal Applications: The MADS Approach*. Springer. 49, 77

- PARENT, C., SPACCAPIETRA, S., ZIMANYI, E., DONINI, P., PLAZANET, C., VANGENOT, C., ROGNON, N., POULIOT, J. et CRAUSAZ, P.-A. (1997). MADS: un modèle conceptuel pour des applications spatio-temporelles. *Revue internationale de Géomatique*, 7(3-4):317–352. [49](#), [101](#)
- PATIL, L., DUTTA, D. et SRIRAM, R. (2005). Ontology formalization of product semantics for product lifecycle management. *ASME 2005* [51](#)
- PHILIPPE DUBÉ (2006). La mise en laboratoire du musée. *La lettre de l'Office de coopération et d'information muséales*, 106:11–17. [62](#)
- PHILIPPE DUBÉ et COURCHESNE, L. (2012). Un lieu qui parle : la modélisation architecturale 3D vers une quatrième dimension. *Hereditas Monasterium*, 1:129–137. [62](#)
- PICK, S., HENTSCHEL, B., TEDJO-PALCZYNSKI, I., WOLTER, M. et KUHLEN, T. (2010). Automated positioning of annotations in immersive virtual environments. In KUHLEN, T., COQUILLART, S. et INTERRANTE, V., éditeurs : *Joint Virtual Reality Conference of EuroVR - EGVE - VEC*, Stuttgart. [130](#)
- POUYLLAU, S. (2008). Digital humanities en France : le temps des pionniers. [55](#)
- POUYLLAU, S. (2012). Utilisons RDFa pour nos corpus. In *THATCamp : non-conférence sur les humanités numériques*, Paris. Éditions de la Maison des sciences de l'homme. [55](#)
- PRÉVÔT, N. (2013). The Digital Puzzle of the talatat from Karnak. A Tool for the Three-Dimensional Reconstruction of Theban Buildings from the Reign of Amenhotep IV. In POLIS, S. et WINAND, J., éditeurs : *Texts, Languages & Information Technology in Egyptology. Selected papers from the meeting of the Computer Working Group of the International Association of Egyptologists (Informatique & Égyptologie)*, pages 129–138, Liège. [61](#), [74](#), [137](#)
- QUANTIN, M. (2014). Des Halls aux Halles. [93](#)
- RAHAMAN, H. et TAN, B.-k. (2010). Interpreting digital heritage Considering the end user's perspective. In *15th International Conference on Computer-Aided Architectural Design Research in Asia*, pages 93–102. [60](#), [130](#)
- RAHAMAN, H. et TAN, B.-K. (2011). Interpreting Digital Heritage: A Conceptual Model with End-Users' Perspective. *International Journal of Architectural Computing*, 9(1):99–114. [60](#)
- RIECHERT, T., MORGENSTERN, U., AUER, S., TRAMP, S. et MARTIN, M. (2010). Knowledge engineering for historians on the example of the catalogus professorum lipsiensis. *Lecture notes in computer science*, 6497:225–240. [55](#)
- RIEGL, A. (1984). *Le culte moderne des monuments. Son essence, sa genèse*. Seuil, Paris. [20](#)
- RIVIÈRE, G. H. (1989). *La muséologie*. Bordas, dunod édition. [20](#), [34](#)
- ROCHA OLIVEIRA, A., MALGUEIRO, O., GRAVE, L. et FERNANDES MARCOS, A. (2002). Supporting Information Visualization Through Topic Maps. In *Educational Technology*, pages 1256–1262. [130](#)
- ROLLAND-VILLEMOT, B. (2001). Le Traitement des collections industrielles et techniques : de la connaissance à la diffusion. *La lettre de l'OCIM*, 73:13–18. [42](#), [47](#)
- ROTH, C. (2013). Socio-Semantic Frameworks. *Advances in Complex Systems*, 16. [9](#), [53](#)
- ROUCOULES, L. (2007). Contribution à l'intégration des activités collaboratives et métier en conception de produit. Une approche au juste besoin: des spécifications fonctionnelles. *Mémoire de HDR, UTC*. [50](#)

- ROUQUETTE, S. (2007). Geneviève Vidal, Contribution à l'étude de l'interactivité. Les usages des multimédias des musées. *Questions de communication*, (12):449–451. [60](#)
- ROUSSOU, M. (2002). Virtual heritage: from the research lab to the broad public. In *Virtual archaeology : proceedings of the VAST Euroconference*, pages 93–100, Arezzo. [47](#), [130](#)
- RUNZ, C. D. (2008). Imperfection, temps et espace : modélisation, analyse et visualisation dans un SIG archéologique. [43](#)
- SALEH, I. et HACHOUR, H. (2012). Le numérique comme catalyseur épistémologique. *Revue française des sciences de l'information et de la communication*, (1). [80](#)
- SERRAFERO, P. (2000). Cycle de vie, maturité et dynamique de la connaissance: des informations aux cognitions de l'Entreprise Apprenante. *Revue Annuelle UE des Arts et Métiers sur le Knowledge Management*, pages 158–169. [78](#)
- SHNEIDERMAN, B. (1996). The eyes have it: A task by data type taxonomy for information visualizations. In *Visual Languages, 1996. Proceedings., IEEE symposium on*, pages 336–343. [134](#)
- SINCLAIR, P., LEWIS, P., MARTINEZ, K., ADDIS, M. et PRIDEAUX, D. (2006). Semantic Web Integration of Cultural Heritage Sources. *WWW 06 Proceedings of the 15th international conference on World Wide Web*, pages 1047–1048. [55](#)
- STEFANI, C. (2010). *Maquettes numériques spatio-temporelles d'édifices patrimoniaux. Modélisation de la dimension temporelle et multi-restitutions d'édifices*. Thèse de doctorat. [61](#)
- SZABADOS, A.-V., BRIATTE, K. et LETRICOT, R. (2012). Utiliser l'ontologie CIDOC CRM pour l'information relative au patrimoine culturel. In *THATCamp : non-conférence sur les humanités numériques*, Paris. Éditions de la Maison des sciences de l'homme. [55](#)
- SZONIECKY, S. et HACHOUR, H. (2014). Monades pour une éthique des écosystèmes d'information numériques. In *Digital Intelligence*. [53](#)
- TAN, B. et RAHAMAN, H. (2009). Virtual heritage: Reality and criticism. In TIDAFI, T. et DORTA, T., éditeurs : *Joining Languages, Cultures and Visions: CAAD Futures*. [130](#)
- TERZI, S., BOURAS, L. A., DUTTA, D., GARETTI, M. et KIRITSIS, D. (2010). Product lifecycle management—from its history to its new role. *International Journal of Product Lifecycle Management*, 4(4):360–389. [50](#)
- THOMAS, Y. et CUENCA, C. (2009). L'apport des technologies de l'information et de la communication (TIC) à la sauvegarde du patrimoine scientifique et technique contemporain (PATSTEC). *Documents pour l'histoire des techniques*, (18):73–80. [62](#)
- UNESCO (2011). Operational Guidelines for the Implementation of the World Heritage Convention. Rapport technique January, United National Educational, Scientific and Cultural Organisation, Intergovernmental Committee For the Protection of the World Cultural and Natural Heritage. [20](#), [34](#), [36](#), [141](#), [153](#)
- USCHOLD, M. et GRUNINGER, M. (1996). Ontologies: Principles, methods and applications. *The Knowledge Engineering Review*, 11(2):93–136. [51](#)
- USCHOLD, M., KING, M., MORALEE, S. et ZORGIO, Y. (1998). The enterprise ontology. *The Knowledge Engineering Review*, 13(1):31–89. [51](#)

- VIDAL, G. (2006). *Contribution à l'étude de l'interactivité : les usages du multimédia de musée*. Presses Universitaires de Bordeaux. 60
- VIDAL, G. (2012). Les tables interactives dans les expositions scientifiques. *Culture et musées*, 19:111–126. 60
- ZACKLAD, M. (2005). Vers le Web Socio Sémantique : introduction aux ontologies sémiotiques. *Ingénierie des Connaissance 2005*. 53
- ZACKLAD, M., BÉNEL, A., ZAHER, L., CAHIER, J.-p. et ZHOU, C. (2007). Hypertopic: une métasémiotique et un protocole pour le Web socio-sémantique. In FRANCKY TRICHET, éditeur : *18eme journées francophones d'ingénierie des connaissances*, pages 217–228. Cépaduès. 53
- ZACKLAD, M., CAHIER, J.-P. et PÉTARD, X. (2003). Du Web Cognitivement Sémantique au Web Socio-Sémantique. In Journée «Web Sémantique et SHS». 74
- ZACKLAD, M. et GIBOIN, A. (2010). Systèmes d'organisation des connaissances hétérogènes pour les applications documentaires. *Document numérique*, Vol. 13(2):7–12. 13, 48
- ZHU, L., MA, G., MU, Y. et SHI, R. (2009). Reconstruction 3d-models of old Beijing city stuctured light scanning. *22nd CIPA Symposium*. 94

Thèse de Doctorat

Benjamin HERVY

Contribution à la mise en place d'un PLM muséologique dédié à la conservation et la valorisation du patrimoine

Modélisation et intégration de données hétérogènes sur un cycle de vie produit complexe

Contribution to the implementation of a PLM for museology dedicated to the conservation and promotion of cultural heritage

Modelling and integrating heterogeneous data on a product's complex lifecycle

Résumé

La valorisation du patrimoine n'est plus seulement considérée comme un devoir de mémoire mais comme un besoin et un atout économique et pédagogique, facilitée par le développement des technologies numériques. Il convient donc de mettre en place des directives méthodologiques pour une conservation et une valorisation scientifique pérenne de notre patrimoine. La mise en œuvre des outils du génie industriel au profit de l'histoire des techniques et du patrimoine industriel a déjà fait l'objet de recherches théoriques. Cette thèse s'inscrit dans la poursuite de ces travaux et vise à mettre en œuvre un cadre opérationnel pour le Digital Heritage Reference Model (Laroche, 2007) en contexte muséal. Nous présentons une approche duale produit-processus adaptée des problématiques de PLM pour la gestion des connaissances historiques du patrimoine. La méthodologie proposée est mise en place dans un cadre d'application relatif à la valorisation muséographique d'un objet des collections du musée d'histoire de Nantes : la maquette du port de Nantes réalisée en 1899. La solution développée est un dispositif de réalité augmentée in situ couplé à un système d'information multi-métiers. L'utilisation des outils de la réalité virtuelle est également étudiée pour la conception de dispositifs d'aide au processus d'écriture de l'historien. À la frontière disciplinaire entre SPI et SHS, nous contribuons ici à la mise en place d'un PLM muséologique dédié à la conservation et la valorisation du patrimoine.

Mots clés

Génie industriel, Gestion des connaissances, Système d'information, PLM, Ingénierie virtuelle, Muséologie, Patrimoine culturel, Histoire des techniques.

Abstract

Cultural heritage promotion is no more considered as a social duty only but rather an economic and educational opportunity facilitated by the development of digital technologies. It is therefore necessary to develop methodological guidelines for conservation and scientific, sustainable promotion of our cultural heritage. Industrial engineering tools can be of great benefit for the history of technology and industrial heritage as demonstrated in previous research works. This thesis is in the pursuit of these works and aims to study and implement an operational framework for the Digital Heritage Reference Model (Laroche, 2007) in a museum context. The work we expose here focuses on a product-process approach inspired by PLM issues and adapted to the context of the management of historical knowledge for cultural heritage. Finally, we detail the proposed methodology within a concrete framework dedicated to an historical model of the Nantes harbour designed in 1899 and part of the collections of the Nantes History Museum. In this context, we propose an augmented reality device coupled to a multi-business information system. Virtual reality facility is also investigated to provide computer-aided decision making to assist historians' research. Based on transdisciplinary work between engineering and human sciences, we contribute to set up a PLM museum dedicated to the conservation and promotion of cultural heritage.

Key Words

Industrial engineering, Knowledge management, Information system, PLM, Virtual engineering, Museology, Cultural heritage, History of technology.